

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 6 2024

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 6 від 27.12.2024 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано відповідно до Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька, французька, словацька, румунська, італійська.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2024

ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Мовчан К.О.

СИСТЕМИ КЛАСИФІКАЦІЇ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ.....1

Павленко В.Я.

ВИБІР МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ І КОНУСІВ В ПРАКТИЦІ КОНТРОЛЮ
ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ В ГАЛУЗІ ПРИЛАДО- ТА МАШИНОБУДУВАННЯ.....8

Павленко В.Я.

ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА
НА ПІДПРИЄМСТВІ.....14

Тінтурін С.Г.

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У МОНІТОРИНГОВИХ СИСТЕМАХ ОХОРОНИ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....20

Топчій Н.В.

3D-СКАНЕРИ. ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ.....25

Топчій Н.В.

МЕТОДИ ТА СУЧАСНІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ВИРОБНИЦТВІ..30

Чайковський С.Ю.

МЕТРОЛОГІЧНА ЕСКПЕТРИЗА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ – ГАРАНТ ВИГОТОВЛЕННЯ
ЯКІСНОЇ ПРОДУКЦІЇ.....35

Шорнікова С.В.

ЯКІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ДРУКОВАНИХ ПЛАТ. АНАЛІЗ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ.....40

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Sydorchuk A.Yu., Kravchenko I.M.

SPECIFIC ASPECTS OF CAMERA VIEWING ANGLE STABILIZATION DURING
FPV DRONE CONTROL.....46

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Antypchuk V.O., Novosyletsky U.L., Lavrishchev O.O.

ELECTROMAGNETIC INDUCTION AS A BASIS FOR UNCONVENTIONAL METHODS
OF ELECTRICITY GENERATION.....52

Гребьонкін Є.О., Заворотний В.Ф.

ВИКОРИСТАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ В ГАЗОВИХ МЕМС СЕНСОРАХ.....59

Зимовченко В.О.

П'ЯТЕ ПОКОЛІННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ (5G). ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ.
ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ.....69

Лук'янюк С.В.

ІНТЕГРАЦІЯ ПРИНЦИПІВ ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА СКЛАДАННЯ
І КОНЦЕПЦІЇ РЕІНЖИНІРИНГУ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ74

ПРИЛАДИ

Скакун О.В.

ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ВОДНИХ РЕСУРСІВ
У МЕГАПОЛІСАХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ЦЕНТРАХ.....81

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Валуйський С.В., Лисенко О.І., Кисіль А.І.

МЕТОД ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ
МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА86

Валуйський С.В., Лисенко О.І., Кравчук І.В. МЕТОДИ ЗАХИСТУ ВІД АТАК НА ОДНОРАНГОВІ БЛОКЧЕЙН МЕРЕЖІ БІТКОІНА.....	92
Гарист А.В. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ.....	99
Зимовченко В.О. ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ. ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА МАЙБУТНЄ.....	104
Ivanchuk O.V., Kozel V.M., Drozdova Ie.A., Prykhodko O.O. RESEARCH OF THE METHODS FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN IEEE 802.15.4 PROTOCOLS.....	112
Катін П.Ю., Мішин О.В. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК СПЕКТРУ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНО МОДУЛЬОВАНОГО СИГНАЛУ.....	118
Левченко Д.С., Баранов Є.О., Гаврилюк А.О., Малий О.Ю. СТРУКТУРА ТА ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ЗАВДАНЬ.....	124
Луцюк А.В. ПРЕДИКТИВНИЙ МОНІТОРИНГ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	129
Петровський А.А. СЕГМЕНТАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БІНАРНОГО ДЕРЕВОПОДІБНОГО НАЇВНОГО БАССА.....	135
Саражинський В.О., Лебедев Д.Ю., Антонюк О.І. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ВЕРИФІКАЦІЇ, ЯКИЙ ҐРУНТУЄТЬСЯ НА РАНДОМІЗАЦІЇ З ОБМЕЖЕННЯМИ, ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ БЛОКУ DMA СИНТЕЗОВАНОГО МОВАМИ ОПISУ АПАРАТУРИ.....	141
Соколов К.А., Чмельов В.О. ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОВОРОТНОЮ РОБОТИЗОВАНОЮ ВІДЕОКАМЕРОЮ PTZ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОТОКОЛУ ONVIF.....	146

ЕНЕРГЕТИКА

Бебяновська О.А., Сухий К.М., Сергієнко Я.О., Єрьомін О.О., Прокопенко О.М., Фролова Л.А. ПРОЦЕСИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АДСОРБЦІЙНОГО КОНДИЦІОНЕРА НА ОСНОВІ КОМПОЗИТНИХ АДСОРБЕНТІВ «СИЛКАГЕЛЬ – НАТРІЙ СУЛЬФАТ» ТА «СИЛКАГЕЛЬ – НАТРІЙ АЦЕТАТ».....	157
Ніколаєнко Ю.Є., Хайрнасєв С.М., Хопєрський С.В., Сорокін В.М., Пекур Д.В., Козак Д.В., Ковальєв О.С. РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОТУЖНОГО СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ ДВОФАЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	163

МЕТАЛУРГІЯ

Єфімова В.Г., Юсіна Г.Л., Смірнов Ю.О., Пилипенко Т.М. ВСТАНОВЛЕННЯ ХІМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ МОДИФІКАЦІЇ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В РОЗПЛАВІ СТАЛІ АНАЛІТИЧНИМИ МЕТОДАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	169
---	-----

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Головенко В.О., Приходько Д.М., Коваль Д.С., Ясногор М.В., Андріянова М.В. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАКОФАРБОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ЗНИЖЕНИМ ВМІСТОМ ЛЕТКИХ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК.....	175
Ковальєв О.С., Літинська М.І. ХРОМОГЕННІ СПОЛУКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ІОНІВ НІКЕЛЮ ТА ПЛЮМБУМУ У ЗРАЗКАХ ВОДИ ТА ВИТЯЖКАХ ҐРУНТІВ.....	180

Малиновський В.В., Мітіна Н.Б. ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ПОКРАЩУВАЧА ҐРУНТУ ШЛЯХОМ АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ.....	186
Мельник В.Д., Бандура В.В., Яциняк І.І., Вацеба Б.В., Глібчук А.Б. ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ МУЛЬТИМЕДІЙНОГО КОНТЕНТУ НА РІВНІ ОБОЛОНКИ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ.....	193
Мельник Л.І., Свідерський В.А., Колобовнікова Є.А. ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД І КОНЦЕНТРАЦІЯ АНДЕЗИТУ ЯК ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ.....	201
Савіцький Д.О., Кириленко М.І., Майзеліс А.О. ПОРІВНЯННЯ СТІЙКОСТІ ДО ДЕГРАДАЦІЇ ОДНОШАРОВОГО І МУЛЬТИШАРОВОГО ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ ZN-NI-CU	207
Семичаєвський С.В., Несенюк Л.П. ПРО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ В МАШИНИХ ЗАЛАХ АТОМНИХ І ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	213
Скиба М.І., Коваленко І.І., Скиба Ю.М., Кунц Д.В., Купрін М.О., Воробйова В.І. ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПЛАЗМОХІМІЧНО ОДЕРЖАНИХ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ КОЛОРИМЕТРИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ВИБУХОВИХ НІТРОАРОМАТИЧНИХ РЕЧОВИН....	220
ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ	
Дмитренко Н.В., Гусарова О.В. ВПЛИВ НВЧ-ОБРОБКИ НА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАРЕНХІМНИХ ТКАНИН ЯБЛУК, КОНВЕКТИВНЕ СУШІННЯ ТА ОРГАНОЛЕПТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЧИПСІВ.....	226
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	234

CONTENTS

INDUSTRIAL ENGINEERING

Movchan K.O.

CLASSIFICATION SYSTEMS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES
AND THEIR APPLICATION IN VARIOUS INDUSTRIES.....1

Pavlenko V.Ya.

CHOICE OF METHODS AND TOOLS FOR MEASURING ANGLES AND CONES
IN THE PRACTICE OF CONTROL OF PARTS AND PRODUCTS IN THE FIELD
OF INSTRUMENT AND MECHANICAL ENGINEERING.....8

Pavlenko V.Ya.

EFFECTIVENESS OF METROLOGICAL SECURITY OF PREPARATION
OF VIBRATIONS IN INDUSTRIES.....14

Tinturin S.G.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENVIRONMENTAL PROTECTION
MONITORING SYSTEMS.....20

Topchii N.V.

3D-SCANNERS. PRINCIPLES OF OPERATION AND ANALYSIS OF THE CURRENT STATE.....25

Topchii N.V.

METHODS AND MODERN MEANS OF CONTROLLING MECHANICAL PARTS
IN PRODUCTION.....30

Tchaikovskiy S.Yu.

METROLOGICAL EXAMINATION OF TECHNICAL DOCUMENTATION –
A GUARANTEE OF QUALITY PRODUCTS.....35

Shornikova S.V.

QUALITY OF PRINTED CIRCUIT BOARD PRODUCTION.
ANALYSIS OF INTERNATIONAL STANDARDS.....40

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Sydorchuk A.Yu., Kravchenko I.M.

SPECIFIC ASPECTS OF CAMERA VIEWING ANGLE STABILIZATION DURING
FPV DRONE CONTROL.....46

ELECTRICAL ENGINEERING

Antypchuk B.O., Novosyletsky U.L., Lavrishchev O.O.

ELECTROMAGNETIC INDUCTION AS A BASIS FOR UNCONVENTIONAL METHODS
OF ELECTRICITY GENERATION.....52

Hrebonkin Ye.O., Zavorotnyi V.F.

THE USE OF NANOMATERIALS IN GAS MEMS SENSORS.....59

Zymovchenko V.O.

FIFTH GENERATION OF MOBILE COMMUNICATION (5G).
ADVANTAGES AND DISADVANTAGES. IMPLEMENTATION IN UKRAINE AND THE WORLD..69

Lukyanuk S.V.

INTEGRATION OF PRODUCTION AND ASSEMBLY DESIGN PRINCIPLES
AND CONCESSIONING OF PRODUCTION PROCESS REENGINEERING.....74

EQUIPMENT

Skakun O.V.

MEASURING TECHNIQUE TOOLS FOR ENVIRONMENTAL CONTROL
IN MEGACITIES AND INDUSTRIAL CENTERS.....81

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Valuiskyi S.V., Lysenko O.I., Kysil A.I.

THE METHOD OF ENERGY-EFFICIENT CLUSTERIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS USING UAV..... 86

Valuiskyi S.V., Lysenko O.I., Kravchuk I.V.

METHODS FOR PROTECTION AGAINST ATTACKS ON PEER-TO-PEER BLOCKCHAIN NETWORKS OF BITCOIN..... 92

Haryst A.V.

HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF CELLULAR COMMUNICATION NETWORKS..... 99

Zymovchenko V.O.

WIRELESS CHARGING TECHNOLOGIES: EXPLORATION OF INNOVATIVE SOLUTIONS, OPERATING PRINCIPLES, AND FUTURE PROSPECTS.....104

Ivanchuk O.V., Kozel V.M., Drozdova Ie.A., Prykhodko O.O.

RESEARCH OF THE METHODS FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN IEEE 802.15.4 PROTOCOLS.....112

Katin P.V., Mishyn O.Yu.

ANALYTICAL CALCULATION OF THE SPECTRUM OF A PULSE WIDTH MODULATED SIGNAL..... 118

Levchenko D.S., Baranov E.O., Gavryliuk A.O., Malyi O.Yu.

STRUCTURE AND MAIN COMPONENTS OF MODERN UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR AUTONOMOUS TASKS.....124

Lutsiuk A.V.

PREDICTIVE MONITORING OF INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS USING A SPECIALIZED MACHINE LEARNING MODEL.....129

Petrovskyi A.A.

SEGMENTATION OF SATELLITE IMAGES USING A BINARY TREE-BASED NAIVE BAYES CLASSIFIER..... 135

Sarazhynskyi V.A., Lebedev D.Yu., Antonyuk A.I.

IMPLEMENTATION OF A CONSTRAINED RANDOM ALGORITHM FOR VERIFICATION OF THE DMA CONTROLLER MODULE SYNTHESISED IN HARDWARE DESCRIPTION LANGUAGES.....141

Sokolov K.A. Chmelov V.O.

SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF A MOTION CONTROL SYSTEM FOR A PTZ ROBOTIC VIDEO CAMERA USING THE ONVIF PROTOCOL.....146

POWER ENGINEERING

Belyanovskaya E.A., Sukhyi K.M., Serhienko Ya.O., Yeromin A.O., Prokopenko O.M., Frolova L.A.

OPERATIONAL PROCESSES OF ADSORPTION CONDITIONER BASED ON “SILICA GEL – SODIUM SULFATE” AND “SILICA GEL – SODIUM ACETATE” COMPOSITE ADSORBENTS.....157

Nikolaenko Yu.E., Khairnasov S.M., Khoperskyi S.V., Sorokin V.M.,

Pekur D.V., Kozak D.V., Kovalev O.S.

DEVELOPMENT OF A NEW DESIGN OF COOLING SYSTEM BASED ON TWO-PHASE TECHNOLOGIES FOR A HIGH-POWER LED LIGHTING DEVICE163

METALLURGY

Yefimova V.G., Yusina G.L., Smirnov Yu.O., Pilipenko T.M.

ESTABLISHMENT OF THE CHEMICAL MECHANISM OF MODIFICATION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN MOLTEN STEEL USING ANALYTICAL RESEARCH METHODS..... 169

CHEMICAL TECHNOLOGY

Holovenko V.O., Prykhodko D.M., Koval D.S., Yasnohor M.V., Andriianova M.V.

PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF PAINT MATERIALS WITH REDUCED CONTENT OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS.....175

Kovalyov O.S., Litynska M.I. CHROMOGENEIC COMPOUNDS FOR DETERMINING THE CONTENT OF NICKEL AND LEAD IONS IN WATER SAMPLES AND SOIL EXTRACTS.....	180
Malynovskyi V.V., Mitina N.B. TECHNOLOGY OF GETTING SOIL IMPROVER BY AEROBIC COMPOSTING.....	186
Melnyk V.D., Bandura V.V., Yatsyniak I.I., Vatsaba B.V., Hlibchuk A.B. EFFICIENCY EVALUATION OF MULTIMEDIA CONTENT INTEGRATION AT THE LEVEL OF THE EXPERT SYSTEM SHELL.....	193
Melnyk L.I., Sviderskyi V.A., Kolobovnikova Ye.A. GRANULOMETRIC COMPOSITION AND CONCENTRATION OF ANDESITE AS FACTORS INFLUENCING THE PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES.....	201
Savitskyi D.O., Kyrilenko M.I., Maizelis A.O. COMPARISON OF THE RESISTANCE TO DEGRADATION OF SINGLE-LAYER AND MULTI-LAYER COATINGS BASED ON ZN-NI-CU ALLOYS.....	207
Semychayevsky S.V., Nesenjuk L.P. ON THE RESEARCH OF THE FIRE HAZARD OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS IN MACHINE ROOMS OF NUCLEAR AND THERMAL POWER PLANTS.....	213
Skyba M.I., Kovalenko I.L., Skyba Yu.M., Kuntz D.V., Kuprin M.O., Vorobiova V.I. FUNCTIONALIZATION OF PLASMACHEMICALLY OBTAINED GOLD NANOPARTICLES FOR THE COLORIMETRIC DETERMINATION OF EXPLOSIVE NITRO-AROMATIC SUBSTANCES.....	220
TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY	
Dmytrenko N.V., Husarova O.V. INFLUENCE OF MICROWAVE TREATMENT ON PHYSICAL PROPERTIES OF APPLE PARENCHYMA TISSUES, CONVECTIVE DRYING AND ORGANOLEPTIC PROPERTIES OF CHIPS.....	226
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	234

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 629.735

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/01>**Мовчан К.О.**Український науково-дослідного інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

СИСТЕМИ КЛАСИФІКАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ

Стаття присвячена аналізу сучасних підходів до класифікації типів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з урахуванням досягнень у сфері авіоніки, систем управління, масо-габаритних характеристик, конструкційних особливостей, функціонального призначення та систем зв'язку за останні два десятиліття. У статті розкрито ключові аспекти розвитку технологій БПЛА, що сприяли зростанню їхньої популярності серед цивільних і військових користувачів. З'ясовано, що вдосконалення апаратних і програмних рішень зробило можливим інтеграцію дронів у системи вищого рівня, створюючи складніші системи, які забезпечують підвищену ефективність та адаптивність у широкому спектрі застосувань. Слід зазначити, що найбільш ефективно застосування дронів досягається завдяки їх інтеграції із уже існуючими технологічними платформами. Такий підхід забезпечує синергетичний ефект та розширює межі можливого використання цих систем. Аналіз літератури показав, що основні напрями використання БПЛА охоплюють такі сфери, як сільське господарство, логістика, екологічний моніторинг, пошуково-рятувальні операції, військові місії, картографування та автономна навігація в умовах обмеженого доступу до GPS. У дослідженні наведено поглиблену класифікацію БПЛА, що враховує ключові параметри, такі як вага, конструкційні характеристики (наприклад, фіксоване крило чи мультикоптер), оперативні можливості (радіус дії, тривалість польоту, вантажопідйомність) та цільові функції. З'ясовано, що така багатовимірна класифікація є корисною для створення нових моделей БПЛА та визначення їхніх потенційних галузей застосування. У статті розкрито актуальні питання класифікації безпілотних літальних апаратів. Визначено, що систематизація БПЛА за різними ознаками дозволяє оптимізувати їх використання в різних галузях. Розглянуто основні наукові напрями досліджень у цій галузі, що дозволяє оцінити динаміку розвитку технологій БПЛА. Наголошується, що подальші дослідження в цьому напрямку сприятимуть вдосконаленню характеристик БПЛА, підвищенню їхньої універсальності та забезпеченню відповідності новим вимогам сучасних технологічних систем.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, класифікація БПЛА, однороторні БПЛА, багатороторні БПЛА, БПЛА з фіксованим крилом, гібридні БПЛА.

Постановка проблеми. Безпілотні літальні апарати (БПЛА, UAV – Unmanned aerial vehicles), відомі як дрони, стали об'єктом інтенсивного дослідження в багатьох дисциплінах, включаючи як військове, так і цивільне застосування. Підвищений інтерес до них зумовлений винятковими характеристиками стабільності, витривалості та універсальності, які забезпечують ефективне виконання різноманітних операцій. Інтеграція сучасних технологій, включаючи Інтернет речей, системи зв'язку п'ятого покоління, а також штучного інтелекту та машинного навчання, сприяє експоненційному зростанню використання БПЛА. Протягом останнього десятиліття БПЛА використовувалися в різних сферах, включаючи,

але не обмежуючись ними – виявлення і відстеження об'єктів, громадську безпеку, моніторинг дорожнього руху, військову розвідку, дослідження прихованих або небезпечних середовищ, навігацію (як в приміщенні, так і на відкритому просторі), збір атмосферних і метеорологічних даних, реагування на стихійні лиха, логістику в охороні здоров'я, обмін даними, обслуговування інфраструктури, кризовий менеджмент, вантажні перевезення, моніторинг лісових пожеж і загальну логістику в мережі поставок [1].

Технічно БПЛА визначаються як безпілотні літальні апарати, здатні здійснювати тривалий автономний або напіваавтономний політ без участі людини-оператора на борту. Ця здатність робить

їх економічно вигідною альтернативою пілотованим системам, особливо для критично важливих місій, які можуть становити значний ризик для життя людей. БПЛА працюють у двох основних режимах: дистанційно пілотовані або автономні. У дистанційно пілотованому режимі команди управління передаються з наземної станції за допомогою пульта дистанційного керування. З іншого боку, в автономному режимі БПЛА використовують складні бортові системи, включаючи автопілот, системи глобального позиціонування (GPS – global positioning system), інерціальні вимірювальні прилади (IMU – inertial measurement unit) та інші сучасні датчики [2]. Ці функції дозволяють БПЛА виконувати складні місії з мінімальним втручанням людини.

У військовій сфері БПЛА суттєво трансформували оперативні стратегії, забезпечуючи інноваційні рішення, які ставлять акцент на швидкому розгортанні, гнучкості та забезпеченні безпеки особовому складу [3]. Здатність БПЛА здійснювати доставку "останньої милі" у критичних умовах змінила правила гри. Крім того, БПЛА відомі своєю масштабованістю, адаптивністю і здатністю до самоорганізації, що робить їх важливими інструментами в сучасних військових операціях. Їх висока маневреність у поєднанні з економічною ефективністю ще більше підкреслює їх корисність у різних військових і цивільних контекстах. БПЛА характеризуються значною варіативністю у своїй конструкції та експлуатаційних характеристиках, що дозволяє їм відповідати специфічним вимогам місій. Вони можуть мати різну конфігурацію, розміри, вагу, дальність польоту, типи двигунів та експлуатаційні характеристики. З наукової точки зору, інтеграція БПЛА з новими технологіями, такими як штучний інтелект, машинне навчання і периферійні обчислення, ще більше розширила їхній потенціал. Наприклад, алгоритми на основі штучного інтелекту дозволяють БПЛА обробляти дані в реальному часі, уникати перешкод і приймати рішення в динамічному середовищі. Аналогічно, досягнення в галузі акумуляторних технологій і систем управління енергоспоживанням дозволяють подолати обмеження витривалості польоту, а гібридні двигуни забезпечують баланс між продуктивністю і ефективністю. Крім того, використання ройового інтелекту в операціях БПЛА дозволяє створювати скоординовані системи з декількох дронів, які підвищують оперативну ефективність в таких сферах, як пошуково-рятувальні місії і широкомасштабний моніторинг довкілля.

Велике різноманіття типів БПЛА надає можливість нести широкий спектр корисного навантаження, включаючи засоби зв'язку, навігаційні системи, камери з високою роздільною здатністю та спеціалізовані датчики для збору та аналізу даних [4]. Така адаптивність привела до створення різних класифікацій БПЛА на основі параметрів, таких як структурна конфігурація, типи силової установки, вагові категорії, дальність польоту та розмір. Таким чином, класифікація дронів за різними критеріями має вирішальне значення для їхнього ефективного застосування в різних галузях. Розробка та вдосконалення такої класифікації дозволяє підвищити ефективність використання БПЛА у сферах з високими вимогами до точності і надійності, таких як розвідка, логістика, моніторинг, військові місії, тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпілотні літальні апарати стали трансформаційною технологією завдяки своїй компактній конструкції, простоті експлуатації, підвищеній надійності та економічній ефективності. Ці якості роблять БПЛА все більш привабливими для різноманітних застосувань у багатьох секторах. Універсальність і адаптивність безпілотників призвели до їх широкого впровадження, демонструючи їх важливість як у цивільній, так і у військовій сферах. У всьому світі БПЛА інтегровані в різні оперативні і дослідницькі сценарії, кожен з яких відповідає одній з шести основних функціональних категорій. Дані категорії охоплюють широкий спектр діяльності – від спостереження і розвідки до логістики, сільськогосподарського моніторингу і збору екологічних даних. Функціональне розмаїття БПЛА прискорило прогрес у таких сферах, як ліквідація наслідків стихійних лих, точне землеробство, міське планування і громадська безпека, де збір даних в режимі реального часу має вирішальне значення. Згідно з результатами досліджень, представлених в роботах [5-7], БПЛА можуть бути класифіковані за шістьма основними критеріями.



Рис. 1. Класифікація БПЛА

Така класифікація, візуалізована на рис. 1, дозволяє систематизувати різноманітність сучас-

них безпілотних літальних апаратів та є важливим інструментом для подальшого розвитку теорії та практики їх застосування.

Хоча сам БПЛА є ядром повітряної системи, його успішне розгортання для будь-якого конкретного застосування вимагає додаткових важливих компонентів. Ці компоненти включають системи зв'язку, наземні станції управління, навігаційні модулі, корисне навантаження (наприклад, камери, датчики або механізми доставки) і системи електроживлення. Разом ці елементи утворюють інтегровану систему, яку в літературі називають безпіотною авіаційною системою (UAS – unmanned aerial systems). Такий комплексний підхід підкреслює взаємозалежність апаратного і програмного забезпечення для забезпечення оптимальної продуктивності і функціональності в реальних операціях. Однак практичне застосування БПЛА пов'язане з низкою проблем, зокрема, з виконанням критично важливих вимог щодо довговічності, експлуатаційної ефективності та безпеки. Авторами в роботі [8] детально досліджено ці питання та зазначено, що подолання цих бар'єрів є життєво важливим для успішної інтеграції БПЛА в різноманітні сфери застосування. Їхнє дослідження підкреслює потребу в надійних конструкціях і системах, здатних протистояти стресам при виконанні місій, зберігаючи при цьому експлуатаційну надійність і відповідність стандартам безпеки. Ці аспекти є особливо важливими, оскільки БПЛА все частіше застосовуються в складних і чутливих операціях, таких як спостереження, ліквідація наслідків стихійних лих і точне землеробство, військові місії. У дослідженні [9] автори зосередили увагу на інших критеріях БПЛА, розглядаючи електричні, гібридні та турбоелектричні силові установки. Вони надають детальний порівняльний аналіз, окреслюючи сильні і слабкі сторони, пов'язані з кожним типом. Наприклад, електрична силова установка має такі переваги, як знижений рівень шуму і нульові викиди, що робить її ідеальною для використання в міських умовах і в екологічно чутливих операціях. Однак дальність і витривалість БПЛА часто обмежені сучасними акумуляторними технологіями. Гібридні системи являють собою компроміс, забезпечуючи більший запас ходу і гнучкість експлуатації, але за рахунок підвищеної складності і вимог до обслуговування. Турбоелектричні системи, з іншого боку, пропонують вищу ефективність і масштабованість для більших платформ, але створюють проблеми з точки зору вартості та інтеграції. Результати аналізу вказують на

необхідність індивідуального підбору силових установок для кожної місії БПЛА, що передбачає постійний розвиток технологій акумуляції та перетворення енергії.

У роботі [10] дослідники проаналізували розвиток персональних літальних апаратів (PAV – personal air vehicle), які представляють собою підгрупу БПЛА, призначених для індивідуальних перевезень. У їхньому дослідженні визначено критичні особливості БПЛА, які потребують вдосконалення для повної реалізації потенціалу цього типу БПЛА. До них відносяться розширені можливості автономної навігації, більша енергоефективність і вдосконалені механізми безпеки. Дослідники також вказують на важливість нормативно-правової бази та суспільного визнання для впровадження PAV. У міру того, як такі транспортні засоби переходять від експериментальних прототипів до операційних систем, вирішення проблем шумового забруднення, енергоємності енергосистем і відмовостійких операційних протоколів стає все більш важливим.

Одним з найважливіших аспектів безпеки експлуатації БПЛА є оцінка потенційних ризиків для наземних об'єктів та людей. Дослідження [11] пропонує детальний огляд існуючих моделей оцінки наземних ризиків, пов'язаних з використанням БПЛА. Автори ідентифікували 33 різні моделі, що свідчить про актуальність та багатогранність цієї проблематики. Така класифікація є необхідною для розробки ефективних стратегій управління ризиками та забезпечення безпечного використання безпілотних систем. Наприклад, моделі ризику враховують такі фактори, як розмір літального апарату, висота польоту, щільність населення в районі проведення операції і ймовірність збоїв у роботі системи. Крім того, інтеграція аналізу ризиків на ранніх стадіях проектування і планування експлуатації БПЛА може значно покращити профіль безпеки цих систем.

Постановка завдання. Незважаючи на бурхливий розвиток технологій БПЛА, проблема їх систематизації залишається актуальною. Відсутність єдиної, всеосяжної класифікації, яка б враховувала різноманітність конструктивних особливостей, функціональних можливостей та сфер застосування БПЛА, ускладнює проведення порівняльного аналізу та обмежує можливості для розробки ефективних систем управління та контролю. Крім того, існуюча література не містить достатньої кількості досліджень, присвячених комплексній оцінці ефективності різних класів БПЛА в залежності від умов експлуатації.

Мета даної роботи полягає в аналізі сучасних підходів до класифікації БПЛА, розгляді основних критеріїв для розробки універсальної класифікаційної схеми та визначенні ключових показників ефективності, які дозволять об'єктивно оцінювати потенціал різних типів БПЛА для виконання конкретних завдань.

Виклад основного матеріалу. БПЛА зазнали значної еволюції, трансформувались з експериментальних платформ у високотехнологічні інструменти, що використовуються в широкому спектрі галузей. Ініціальне сприйняття БПЛА як іграшок змінилося завдяки прогресу в області автоматизації, розробки датчиків та алгоритмів управління. Сьогодні БПЛА є невід'ємною частиною багатьох технологічних систем, що знаходить своє відображення в різноманітності їх застосування: від сільського господарства та моніторингу довкілля до логістики, військових місій та розваг [12]. Розуміння цієї різноманітності вимагає систематичної класифікації БПЛА за різними критеріями [13].

Однією з ключових характеристик, що визначають функціональні можливості БПЛА та сферу їх застосування, є їхня маса [14]. Класифікація БПЛА за вагою є фундаментальною, оскільки вона безпосередньо пов'язана з такими параметрами, як вантажопідйомність, дальність польоту, тривалість місії та складністю систем управління. Цей метод класифікації дозволяє виокремити категорії БПЛА, що відрізняються за призначенням та вимогами до експлуатації. Таким чином БПЛА можна розділити на наступні категорії, що відображають широкий спектр застосувань:

- нано-дрони – важать менше 250 грамів, в основному використовуються для операцій всередині приміщень, розвідки в обмежених умовах або для особистого використання. У військовому застосуванні вони можуть слугувати як одноразові дрони для розвідки в небезпечних зонах;

- мікро- і міні-дрони – дрони вагою від 250 грамів до 25 кілограмів часто використовуються для комерційних і промислових завдань, таких як картографування, топографічна зйомка і точне землеробство;

- малі та середні дрони – мають вагу від 25 до 150 кілограмів і зазвичай використовуються для логістики, екологічного моніторингу та військової розвідки;

- великі дрони – вагою понад 150 кілограмів, ці БПЛА переважно використовуються для важких завдань, включаючи перевезення вантажів і стратегічні військові місії.

Окрім ваги, БПЛА класифікуються за різними експлуатаційними і конструктивними характеристиками [15], кожна з яких відповідає конкретним оперативним вимогам:

- конфігурація – БПЛА можна розрізнити за їх конструктивним виконанням, наприклад, фіксоване крило, гвинтокрил або гібридна конфігурація. Наприклад, безпілотники з фіксованим крилом підходять для виконання місій на великі відстані завдяки своїй аеродинамічній ефективності, тоді як гвинтокрилі безпілотники відмінно справляються з ширянням і вертикальними злетами;

- експлуатаційні характеристики – критично важливими показниками, що використовуються для класифікації, є розмах крила, вантажопідйомність крила, дальність польоту, максимальна висота, швидкість польоту і тип двигуна. Наприклад:

- дальність польоту – БПЛА малого радіусу дії призначені для виконання локальних завдань, в той час як БПЛА великого радіусу дії можуть долати сотні кілометрів, що робить їх ідеальними для спостереження за кордоном або для служб доставки;

- максимальна висота – висотні дрони необхідні для атмосферних досліджень і військового спостереження;

- швидкість – високошвидкісні дрони знаходять застосування в тактичних військових місіях і реагуванні на надзвичайні ситуації, тоді як повільніші дрони більше підходять для точних завдань, таких як моніторинг посівів та поля битви.

Спосіб зльоту та посадки безпілотних літальних апаратів є визначальним фактором для їх експлуатації [16]. Цей параметр класифікації дозволяє враховувати особливості середовища, в якому працює БПЛА, а також вимоги до мобільності та автономності:

- вертикальний зліт і посадка (VTOL) – БПЛА оснащені можливостями вертикального зльоту і посадки, що робить їх універсальними для обмежених територій;

- горизонтальний зліт і посадка (HTOL) – зазвичай використовується для БПЛА з фіксованим крилом, цей метод оптимізований з точки зору витривалості і дальності польоту.

В залежності від галузі в якій використовується БПЛА, класифікаційні рамки відрізняються, що відображає різноманітні сфери застосування та експлуатаційні характеристики БПЛА. Номенклатура, що використовується в цих класифікаціях,

звичай будується навколо таких параметрів, як маса БПЛА, фізична конфігурація, призначення, ступінь автономності, тип операційного середовища або сфера військового використання. Кожен з цих параметрів дає критично важливе розуміння філософії проектування БПЛА та його оперативного потенціалу. З наукової точки зору, класифікації БПЛА можуть також інтегрувати нові стандарти, які враховують технологічні досягнення, в тому числі підвищення енергоефективності, бортових обчислювальних можливостей і інтеграцію датчиків. Це гарантує, що класифікації будуть відповідати сучасним технологічним розробкам і вимогам застосування.

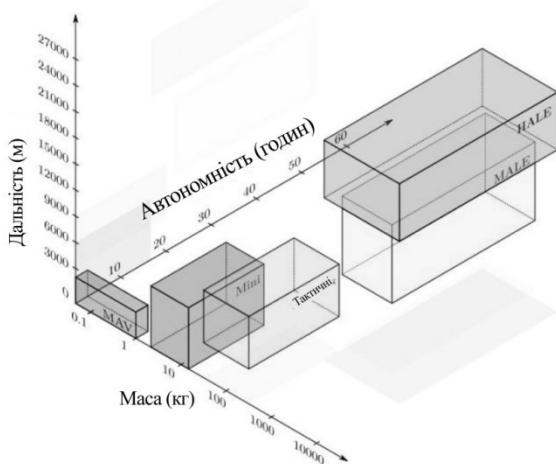


Рис. 2. Класифікація БПЛА за вагою, висотою і автономністю польоту

Так загальноприйнята класифікація (показано на рис. 2) поділяє БПЛА на

п'ять основних категорій: мікро (MAV), міні, тактичні, середньовисотні (MALE – medium altitude) і висотні (HALE – high altitude) БПЛА [17]. Кожна категорія відрізняється своїми унікальними характеристиками і оперативними можливостями. Слід відзначити, що БПЛА типу MALE і HALE за цією класифікацією мають здатність залишатися в повітрі протягом тривалих періодів часу, що надає значні переваги для місій, які потребують тривалої роботи, таких як розвідка, спостереження і моніторинг навколишнього середовища.

Відповідно до структурної і функціональної різноманітності БПЛА можна класифікувати на чотири основні типи: однороторні, багатороторні, з фіксованим крилом і гібридні дрони VTOL (vertical take-off and landing – вертикального зльоту і посадки) [18]. Однороторні БПЛА харак-

теризуються відносно простою конструкцією, що полегшує їх обслуговування і ремонт. Їх основна перевага полягає в здатності транспортувати важкі вантажі на великі відстані зі знизеним енергоспоживанням. Ця ефективність робить їх придатними для таких завдань, як доставка вантажів у віддалені райони або обприскування сільськогосподарських культур. Однак їхні експлуатаційні обмеження включають необхідність безперервного потоку повітря для підтримки стабільності під час польоту. Це обмеження призводить до низької продуктивності для застосувань, що потребують стаціонарного зависання, таких як спостереження або детальні повітряні інспекції. Останні досягнення в області динаміки ротора і систем стабілізації частково пом'якшують ці проблеми, покращуючи їх загальну продуктивність і розширюючи сферу застосування.

Багатороторні дрони, на відміну від однороторних, забезпечують підвищену стабільність і маневреність завдяки кільком роторам, які забезпечують точний контроль і більший ступінь свободи. Найпоширенішим типом є квадрокоптер, що складається з чотирьох роторів. Багатороторні БПЛА ідеально підходять для польотів у приміщеннях і завдань, що потребують стабільного польоту, таких як аерофотозйомка, картографування та інспекція. Хоча вони забезпечують універсальність і простоту використання, їхні основні обмеження включають коротший час польоту і обмежену вантажопідйомність через більш високе споживання енергії. Нові технології, такі як вдосконалені акумуляторні системи і легкі матеріали, допомагають подолати ці обмеження, забезпечуючи більшу тривалість польоту і підвищуючи ефективність корисного навантаження.

Дрони з фіксованим крилом в першу чергу призначені для операцій на великих відстанях і керуються автономно, часто з мінімальним втручанням людини. Хоча середній час польоту таких дронів становить приблизно дві години, останні інновації збільшили їхню витривалість до 16 годин і більше, що робить їх ідеальними для таких застосувань, як моніторинг довкілля, військова розвідка і спостереження за кордонами. БПЛА з фіксованим крилом вирізняються швидкістю, дальністю польоту та довговічністю. Однак їхнє розгортання вимагає спеціальних навичок і обладнання, в тому числі стартових майданчиків або злітно-посадкових смуг, а їхня вартість може бути непомірно високою. Удосконалення аеродинамічних конструкцій, силових установок на сонячних батареях і навігаційних систем на

основі штучного інтелекту значно розширюють їхні можливості, роблячи експлуатацію більш ефективною і економічно вигідною.

Гібридні безпілотники VTOL з фіксованим крилом являють собою синтез технологій фіксованого крила і багатороторних літальних апаратів, поєднуючи в собі сильні сторони обох систем. Ці дрони можуть злітати і сідати вертикально, усуваючи потребу в злітно-посадковій смужі, при цьому зберігаючи тривалість польоту, характерну для конструкцій з фіксованим крилом. Вони особливо корисні для завдань, що потребують універсальності, таких як пошуково-рятувальні місії, геологічні дослідження і перевірка інфраструктури. Ця категорія літальних апаратів вирає від вдосконалення систем управління енергоспоживанням, що дозволяє збільшити тривалість польоту, і гібридних силових установок, які підвищують їхню адаптивність до різноманітних профілів місій.

Висновки. Різноманітність БПЛА зумовлює необхідність їх систематизації за комплексом характеристик: масо-габаритні характеристики, експлуатаційні параметри, конструктивні конфігурації та функціональне призначення. Класифікація дозволяє виділити окремі категорії БПЛА, що відрізняються технологічними рішеннями та сферами застосування. Кожна категорія формується відповідно до специфічних операційних вимог, демонструючи технологічну варіативність БПЛА в сучасних системах. Еволюція технологій БПЛА безпосередньо корелює з модифікацією класифікаційних систем. Легкі БПЛА оптимізовані для рекреаційних та низькоризикових операцій, роблячи акцент на мобільності та економічній ефективності. Натомість, важкі БПЛА з підвищеною конструктивною міцністю застосовуються в промисловому, військовому та дослідницькому секторах, де пріоритетними є довготривала експлуатація та надійність. Експлуатаційні характеристики, включаючи дальність, тривалість польоту та максимальну висоту, є диферен-

ціюючими факторами. БПЛА дальнього радіусу дії інтегруються в системи тривалого спостереження та екологічного моніторингу, тоді як БПЛА малого радіусу оптимізовані для локальних операцій. Конструктивна конфігурація є визначальним параметром: БПЛА з фіксованим крилом характеризуються підвищеною швидкістю та паливною ефективністю, оптимальні для дальніх місій. На відміну від них, гвинтокрилі БПЛА, зокрема квадрокоптери і мультиротори, відрізняються маневреністю і вертикальним злетом, що робить їх ідеальними для застосування в умовах обмеженого простору або в міських умовах. Гібридні БПЛА, що поєднують в собі риси обох типів, представляють зростаючий сегмент, спрямований на подолання операційних прогалів.

Функціональні застосування ще більше розширюють класифікаційний спектр, охоплюючи такі сфери, як військова розвідка, реагування на катастрофи, логістика і автономна навігація в умовах відсутності GPS. Впровадження передових технологій штучного інтелекту і машинного навчання в системи БПЛА також формує додатковий динамічний рівень до їхньої класифікації, забезпечуючи адаптивні функції, такі як аналіз даних в реальному часі і прийняття рішень.

Підсумовуючи, можна зазначити, що класифікація БПЛА – є динамічним і багатогранним процесом, який розвивається разом з технологічним прогресом і оперативними потребами. Постійне вдосконалення цих систем не лише покращує зручність використання і універсальність дронів, але й підкреслює їхню зростаючу роль в різних секторах – від комерційних операцій до складних військових і дослідницьких місій. Результати проведеного дослідження показують, що ієрархічна класифікація БПЛА на основі їх функціональних характеристик та технічних параметрів є стійкою до змінних умов експлуатації. Це дозволяє ефективно використовувати дану класифікацію для розробки систем автоматичного виявлення та ідентифікації БПЛА в реальному часі.

Список літератури:

1. Hassija V., Saxena V., Chamola V. Scheduling drone charging for multi-drone network based on consensus time-stamp and game theory, *Comput. Commun.*, 149, 2019, pp. 51–61.
2. Nourmohammadi A., Jafari M., Zander T.O. A Survey on Unmanned Aerial Vehicle Remote Control Using Brain–Computer Interface, *IEEE Trans. Hum.-Mach. Syst.*, 48, 2018, pp. 337–348.
3. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends, *J. Intell. Robot. Syst.*, 87, 2017, pp. 141–168.
4. Tahir A., Boling J., Haghbayan M.H., Toivonen H.T., PLoSila J. Swarms of unmanned aerial vehicles-A survey, *J. Ind. Inf. Integr.*, 16, 2019, pp. 10106–10127.
5. Washington A., Clothier R.A., Silva J. A review of unmanned aircraft system ground risk models, *Prog. Aerosp. Sci.*, 95, 2017, pp. 24–44.

6. Finn R.L., Wright D. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics, and privacy in civil applications, *Comput. Law Secur. Rev.*, 28(2), 2012, pp.184–194.
7. Bloss, R. Unmanned vehicles while becoming smaller and smarter are addressing new applications in medical, agriculture, in addition to military and security, *Ind. Robot Int. J.*, 41(1), 2014, pp.82–86.
8. Bijjahalli S., Sabatini R., Gardi A. Advances in intelligent and autonomous navigation systems for small UAS, *Prog. Aerosp. Sci.*, 115, 2020, pp. 100617–100629.
9. Brelje B.J., Martins J.R.R.A. Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models and design approaches, *Prog. Aerosp. Sci.*, 104, 2019, pp.1–19.
10. Liu Y., Kreimeier M., Stumpf E., Zhou Y., Liu H. Overview of recent endeavors on personal aerial vehicles: A focus on the US and Europe led research activities, *Prog. Aerosp. Sci.*, 91, 2017, pp. 53–66.
11. Washington A., Clothier R.A., Silva J. A review of unmanned aircraft system ground risk models, *Prog. Aerosp. Sci.*, 95, 2017, pp. 24–44.
12. Finn R.L., Wright D. Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics, and privacy in civil applications, *Comput. Law Secur. Rev.*, 28(2), 2012, pp. 184–194.
13. Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 2017, pp. 99–131.
14. Chan K. W., Nirmal U., Cheaw W. G. Progress on drone technology and their applications: A comprehensive review., In *AIP Conference Proceedings*, 2030(1), 2018, pp. 20308–20334.
15. Alghamdi Y., Munir A., La H. M. Architecture, classification, and applications of contemporary unmanned aerial vehicles., *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 10(6), 2021, pp. 9–20.
16. Dileep M. R., Navaneeth A. V., Ullagaddi S., Danti A. A study and analysis on various types of agricultural drones and its applications., *Fifth International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN) IEEE*, 2020, pp. 181–185.
17. Weibel R., Hansman R. Safety considerations for operation of unmanned aerial vehicles in the national airspace system, *Workshop and Exhibit*, 11, 2006, pp. 161–188.
18. Zaludin Z., Harituddin A. S. M. Challenges and Trends of Changing from Hover to Forward Flight for a Converted Hybrid Fixed Wing VTOL UAS from Automatic Flight Control System Perspective., *IEEE 9th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET) IEEE*, 2019, pp. 247–252.

Movchan K.O. CLASSIFICATION SYSTEMS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES AND THEIR APPLICATION IN VARIOUS INDUSTRIES

The article analyses modern approaches to the classification of types of unmanned aerial vehicles (UAVs), taking into account advances in avionics, control systems, weight and dimensions, design features, functional purpose and communication systems over the past two decades. The article reveals the key aspects of the development of UAV technologies that have contributed to the growth of their popularity among civilian and military users. It is found that the improvement of hardware and software solutions has made it possible to integrate drones into higher-level systems, creating more complex systems that provide increased efficiency and adaptability in a wide range of applications. It should be noted that the most effective use of drones is achieved through their integration with existing technology platforms. This approach provides a synergistic effect and expands the scope of possible use of these systems. A literature review has shown that the main areas of UAV use include agriculture, logistics, environmental monitoring, search and rescue operations, military missions, mapping and autonomous navigation in conditions of limited access to GPS. The study provides an in-depth classification of UAVs, which takes into account key parameters such as weight, structural characteristics (e.g., fixed wing or multicopter), operational capabilities (range, flight duration, payload), and target functions. It has been found that such a multidimensional classification is useful for creating new models of drones and determining their potential applications. The article reveals topical issues of classification of unmanned aerial vehicles. It is determined that the systematisation of UAVs by various features allows optimising their use in various industries. The main scientific areas of research in this area are considered, which allows assessing the dynamics of development of UAV technologies. It is noted that further research in this area will help to improve the characteristics of UAVs, increase their versatility and ensure compliance with the new requirements of modern technological systems.

Key words: *unmanned aerial vehicle, UAV classification, single-rotor UAVs, multi-rotor UAVs, fixed-wing UAVs, hybrid UAVs.*

Павленко В.Я.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ВИБІР МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ І КОНУСІВ В ПРАКТИЦІ КОНТРОЛЮ ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ В ГАЛУЗІ ПРИЛАДО- ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

Велика кількість важливих сучасних наукових та виробничих задач передбачає проведення різноманітних вимірювань механічних величин, зокрема кутів. Високоточні (прецизійні) кутові вимірювання необхідні у багатьох галузях науки і техніки, починаючи з розробки та виготовлення деталей, вузлів та виробів для виробничих, транспортних, військових і побутових потреб, будівництва, геодезії, радіо- та лазерної локації і закінчуючи астрономією, навігаційними та космічними системами [3]. При цьому галузі використання засобів для вимірювання кутів постійно розширюються, а якість кутовимірювальних засобів весь час покращується. Це обумовлено високими вимогами сучасного виробництва до якості продукції та робіт, що пов'язані з виготовленням та контролюванням деталей, вузлів та готових виробів.

Розвиток існуючих та створення нових методів вимірювання кутів та конусів неможливі без аналізу досягнутого рівня, їх різновидів і якості підходів. Вибір засобів вимірювань визначається вимірюваною величиною, прийнятим методом вимірювань та необхідною точністю результату вимірювання. Одну й ту ж метрологічну задачу можна вирішити за допомогою різних вимірювальних засобів, які мають не тільки різну вартість, але і неоднакову точність вимірювань та інші метрологічні показники, а відповідно дають розбіжні результати вимірювань. Вимірювання із застосуванням інструменту недостатньої точності малоцінні, навіть шкідливі, так як можуть бути причиною неправильних висновків. А застосування занадто точних засобів вимірювань економічно не вигідні. Тому при виборі засобів та методів контролю вимірювання кутів та конусів враховують діапазон вимірювань величини, яка вимірюється, клас точності, вимоги конструкторської документації, умови вимірювань, експлуатаційні засоби вимірювань та їх вартість.

В статті розглянуто методи і засоби вимірювання кутів і конусів в деталях та виробках приладо- та машинобудування, виготовленні точного інструменту та вимірювальної апаратури, проектуванні і створенні виробів точної механіки тощо. Проаналізовано види кутовимірювальних засобів (приладів), надано пояснення про кожну сферу їх застосування, обґрунтовано доцільність застосування тих чи інших кутомірів, надано рекомендації щодо їх вибору в залежності від умов конструкторської документації, технологічного процесу, призначення і конструкції виробів. Представлено методи та засоби для вимірювання кутів і конусів.

Ключові слова: кути, конуси, гоніометричні вимірювання, кутовимірювальні засоби, кутоміри, похибка вимірювань, клас точності.

Постановка проблеми. Точність вимірювання в будь-якій галузі чи виробництві має важливе значення, від цього залежить кінцевий результат роботи. При виконанні токарних, фрезерувальних, слюсарних та складальних робіт, де відхилення кута від $\pm 3''$ до $\pm 5''$ (0 клас точності)¹ від заданого розміру загрожує відбракуванням, тому контроль якості вимірювань повинен бути надзвичайно точним. У багатьох виробках приладо- та машинобудування застосовують вузли і деталі, якість роботи яких залежить від точності їх кутових розмірів.

¹ За точністю виготовлення кутові міри поділяються на чотири класи точності: 0, 1, 2 і 3 в порядку зменшення їх точності. Наприклад, для кутових мір 0-го класу точності гранична похибка робочих кутів становить від $\pm 3''$ до $\pm 5''$; 1-го класу – $\pm 10''$; 2-го класу – $\pm 30''$.

Такими вузлами і деталями є, наприклад, підшипники з конічними роликками, які є напрямними (типу «ластівчин хвіст»), кінці шпинделів металорізних верстатів, кінці інструментів, кути оптичних призм тощо. Необхідно враховувати, що якість відповідно до міжнародних стандартів серії ISO 9000, які застосовуються при створенні та удосконаленні систем менеджменту якості організацій, та Державного стандарту України ДСТУ ISO 9002-95 [1] – це комплексне поняття, під яким розуміється сукупність властивостей продукції, що визначає ступінь її придатності для використання за призначенням. Основними показниками якості відповідно до того ж стандарту є точність вимірювань та швидкодія [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вагомі науково-практичні дослідження у цій галузі зроблено такими українськими вченими як О.М. Безвесільна, С.С. Ткаченко [4], І.Ю. Черепанська, М.Ю. Сазонов [5], які розглядають актуальну проблему забезпечення високоточних та високопродуктивних гоніометричних вимірювань², які необхідні в багатьох сучасних науково-технічних задачах у різних галузях промисловості. Більшість відомих на даний час гоніометричних систем характеризується недостатніми точністю і швидкодією, а також складністю і низьким рівнем автоматизації та недосконалістю програмного забезпечення [5]. Тому особливо гостро постає питання щодо вибору вимірювальних засобів та умов виконання вимірювань і оцінювань можливих границь похибки вимірювань. При цьому мається на увазі, що вимірювальний засіб відповідає пред'явленим вимогам і використовується професійним оператором.

Постановка завдання. На сьогодні в промисловості для вимірювань високоточних кутів та конусів використовується багато різновидів кутовимірювальної техніки, побудованої на різних методах. Основною метою цієї статті є ознайомлення з методами, засобами та принципами роботи кутовимірювальних інструментів і пристроїв з ціллю отримання результатів практичного досвіду щодо їх вибору та забезпеченні необхідної процедури контролю вимірювання кутів та конусів деталей, складань та готових виробів, враховуючи специфіку та метрологічне забезпечення лабораторії.

Виклад основного матеріалу. У приладо- та машинобудуванні кутові розміри зустрічаються досить часто: фаски, штампувальні і ливарні відхилення тощо. Кутові розміри можуть бути як незалежними, тобто не пов'язаними розрахунковими залежностями з іншими прийнятими кутовими розмірами, так і залежними – похідними від інших розмірів. Під час проектування та виготовлення продукції необхідною умовою є контроль деталей, вузлів та готових виробів. В розвинених країнах світу промислові підприємства оснащені сучасними верстатами, які виконують міжопераційні контрольні вимірювання безпосередньо в процесі обробки деталей та виробів, що здійснюються вимірювальною технікою вмонтованою в технологічне обладнання з високим ступенем

точності. На жаль, наприкінці 90-ти років минулого століття, машинобудівельна галузь втратила свій виробничий потенціал, всесвітньо відомі машинобудівельні підприємства України, науково-дослідні і проектно-конструкторські установи втратили свої пріоритети, припинили займатися модернізацією верстатів, пріоритетними перспективними дослідженнями і проектуванням верстатів нового покоління за допомогою сучасної інформаційної техніки, а також залучати провідних вчених на умовах договірної та іншого співробітництва. Великі машинобудівельні підприємства почали перетворюватись в окремі малі, без єдиної генеральної стратегії [6], внаслідок чого, на даний час підприємств з сучасним високоточними верстатами та обробними центрами з програмним керуванням в Україні небагато. Тому вимірювання кутових розмірів є задачею складною і, в більшості випадків, потребує вимірювань ручним інструментом.

Кутовимірювальні засоби – це інструмент або вимірювальні прилади, призначені для вимірювання кутів та конусів. Кути деталей та виробів вимірюють трьома основними методами: *методом порівняння* з контрольними мірами – жорсткі кутові міри; *абсолютним гоніометричним методом*, заснованим на використанні приладів з кутомірною шкалою; *тригонометричним методом*, який полягає у визначенні лінійних розмірів, пов'язаних з вимірюваним кутом тригонометричною функцією [2].

Перша група приладів – жорсткі кутові міри (кутники, конусні калібри, шаблони, тощо) призначені для передачі розміру плоского кута від еталонів до зразкових і робочих кутових мір, перевірки і градування кутомірних приладів і спеціальних кутових мір (шаблонів), а також для безпосереднього вимірювання кутових виробів [7]. Для виготовлення і контролю вимірювальної техніки в приладо- та машинобудуванні застосовуються спеціальні мірні плиточки. Існують різні набори призматичних кутових мір призначених для контролю вимірів зовнішніх і внутрішніх кутів інструментів, кутових шаблонів, кутів деталей та виробів. Виготовляються вони із загартованої високоякісної сталі і подаються в набори, виготовлені з кутових плиток³. Вимірювання за допомогою кутових мір (плиток) полягає у встановленні розміру найбільшого просвітку (смуги утвореної світлом) між сторонами вимірюва-

² Гоніометрія це наука, яка базується на вимірюванні кута, застосовується для визначення конкретного кута об'єкта або для розташування об'єкта під конкретним кутом. Прецизійна інтелектуальна гоніометрична система дозволяє проводити високоточні кутові вимірювання при попередній виставці навігаційних чутливих елементів, плоских кутів та пірамідальності призм, а також інших об'єктів виробництва.

³ Існують такі типи кутових плиток: тип I – з одним робочим кутом зі зрізаною вершиною; тип II – з одним робочим кутом гострокутні; тип III – з чотирма робочими кутами. Є набори, які мають ще додатково IV та V типи: IV – призматичні з рівномірним кутовим кроком; V – з трьома робочими кутами.

ного кута та кутової міри або повної відсутності просвітку між ними. Просвіток порівнюють на око із набором просвітів, розміри яких відомі (5 мкм – 10 мкм), або оцінюються за допомогою щупів (більше 30 мкм). Відхилення робочих кутів складають: для мір 1-го класу $\pm 10''$; для мір 2-го класу $\pm 30''$ [7]. Для вимірювання прямих кутів, в залежності від класу точності, застосовують *кутники* різних типів [8]. Метод вимірювання так само, як і в плитках, заснований на вимірюванні просвітку між поверхнями деталі і кутника впродовж торкання цих поверхонь. Промисловість випускає кутники чотирьох класів точності⁴. Найбільш розповсюдженими є кутники у 90° .

До цієї ж групи належать *калібри* (рисунок 1). *Конусний калібр* – без-шкальний засіб вимірювальної техніки, призначений для контролю, який відтворює кутові розміри, і який контактує з елементами виробу поверхнями, лініями чи точками. Калібрами не можна вимірювати дійсні значення кутів деталей та визначати їх числові значення. Вони служать тільки для перевірки числових значень кутів деталей і визначення класу точності відповідно конструкторській документації. За допомогою конусних калібрів з'ясовують чи знаходиться дійсний розмір кута, що вимірюється, у полі допуску. Для перевірки кута конусності вала застосовують калібри-втулки (повні та неповні), а для перевірки кута конусних втулок – конусні калібри-пробки. При контролі кута конусності вала вздовж лінії, що утворює конус м'яким графітовим олівцем наносять пряму лінію та обережно вводять вал всередину конусного калібру-втулки. Прикладають достатнє осьове зусилля для щільного прилягання конічних поверхонь вала та втулки, повертають їх відносно один одного на невеликий кут. Якщо лінія, що утворює конус вала прямолінійна і кут конуса виконаний правильно, то графіт олівця рівномірно розподілиться вздовж усієї довжини конуса, в противному випадку утворяться риси чи окремі плями. При перевірці внутрішньої конічної поверхні деталі лінію олівцем наносять на калібр-пробку [8].



Рис. 1. Конусні калібри

⁴Клас точності кутника характеризує значення похибки, тобто відхилення кінця довгої сторони кутника від перпендикуляра, опущеного на основу. Кутники 0-го класу застосовують для лекальних робіт, 1-го класу – для особливо точних робіт, 2-го класу – для звичайних робіт, 3-го класу – для монтажних робіт.

До другої групи відносять прилади для вимірювання кутів методом порівняння їх з кутом, на який налаштовується вимірювальний прилад, наприклад *тангенсні і синусні лінійки*, які служать для точних вимірювань кутів непрямым методом: спочатку визначають лінійні відхилення, які шляхом тригонометричних обчислень перетворюють у кутові величини [2].

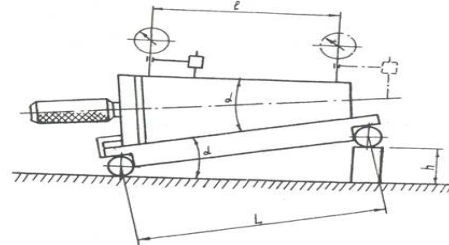


Рис. 2. Встановлення синусної лінійки

На роликах однакового діаметру з точно витриманою відстанню (L) між їх осями (100 мм або 200 мм) встановлено столик, площина якого паралельна лінії, що з'єднує осі роликів. При встановленні синусної лінійки на плиті (рисунок 2) площина столика буде паралельна площині плити, а при зміні положення одного із роликів відносно площини плити столик буде розташований до неї під кутом. Під ролик підкладаємо блок кінцевих мір певного розміру (h). На точній плиті встановлюють синусну лінійку і тримач з вимірювальною головою* (індикатором, мікрокатером і т.п.). Потім на столик встановлюють деталь, яку необхідно виміряти, з використанням упорних планок, які запобігають її зміщенню. Розмір блоку кінцевих мір (h) розраховується за формулою $h = L \times \sin \alpha$, де L – відстань між осями роликів, α – номінальний кут деталі. Перевірка відхилення від паралельності проводиться переміщенням тримача з вимірювальною головою. Для визначення дійсного кута деталі лінійні відхилення шляхом обчислень перетворюють в кутові величини за формулою $\sin \alpha = h/L$, де h – розмір блоку кінцевих мір після того, як твірна конусної деталі, що вимірюється виставлена паралельно плиті.

*Примітка. Вимірювальні головки, індикатори, мікрокатери, тощо [2] застосовуються для вимірювання кутів при використанні пристроїв, що фіксують необхідне кутове положення граней або інших елементів деталі. Відлікові пристрої вимірювальних головок бувають як механічними (лімба з ноніусом), так і оптичними.

Принцип синусної лінійки використовується, наприклад, у конструкціях різних приладів для передачі рухів під кутом до основного руху, у пристроях до металорізальних верстатів при обробці деталей із похилими поверхнями.

Широкого застосування в приладобудуванні, машинобудуванні та інших галузях промисловості набули прилади, які базуються на порівнянні вимірюваного кута з кутовою шкалою: кутоміри з ноніусом, оптичні кутоміри, ділильні головки, ділильні столи, гоніометри і т. д., які становлять *третю групу приладів*.

Промисловість випускає *механічні (ноніусні) кутоміри* різних конструкцій. За конструкцією механічні (ноніусні) кутоміри відрізняються тим, що одні кутоміри застосовують для вимірювання зовнішніх кутів, інші є більш універсальними.



Рис. 3. Універсальний кутомір з ноніусом

Універсальні кутоміри з ноніусом (рисунок 3) призначені для вимірювання зовнішніх і внутрішніх кутів в зазначених діапазонах та використовуються як засіб вимірювання при проведенні робіт з механічної обробки деталей або для контролю точності виготовлення при прийманні готових деталей та вузлів відділами технічного контролю [7]. Ціна поділки основної шкали у всіх кутомірив 1° , ціна поділки ноніусної шкали буває $2'$, $5'$ і $10'$. Механічні шкальні кутоміри мають кутовий ноніус. Правила відліку кутовим ноніусом аналогічні правилам відліку за ноніусом штангенциркуля і інших штангенінструментів, тільки вимірюване значення виражене в кутових одиницях.

Універсальний кутомір використовується для вимірювання зовнішніх кутів від 0 до 180° і внутрішніх від 40° до 180° .

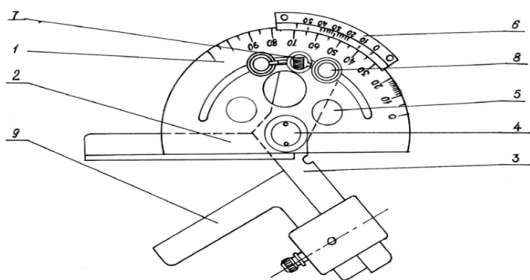


Рис. 4. Транспортний кутомір

Транспортним кутоміром (рисунок 4) вимірюють зовнішні кути від 0 до 180° [10]. Основні час-

тини кутоміра – напівдиск 1 з двома лінійками 2 і 3. Лінійка 2 жорстко з'єднана з напівдиском 1, а лінійка 3 може обертатися навколо вісі 4 разом із сектором 5, на якому закріплено ноніус 6. Точне встановлення за ноніусом виконується мікрометричним гвинтом 7. Лінійка 3 закріплюється гвинтом 8. Застосовуючи додатковий косинець 9, можна виміряти зовнішні кути від 0 до 90° . Ціна поділки транспортного кутоміра становить $2'$ і $5'$. Похибка показань кутоміра не перевищує $\pm 2'$ і $\pm 5'$.



Рис. 5. Кутонір маятниковий

Маятникові кутоміри (рисунок 5) призначені для того, щоб отримувати точні вимірювання. Вони поширені в інструментальному виробництві, працюють за принципом маятника. Шкала залишається нерухомою, переміщується під час використання тільки стрілка, яка ставиться на протизагу. На круговій шкалі маятникового кутоміра є ділення. За ним відраховуються кути повороту маятника. При проведенні вимірювань, контрольна лінійка встановлюється на поверхні використовуваного ріжучого інструменту [11].

Оптичні кутоміри (рисунок 6) відрізняються по наявності так званого «ока» – оптичної лінзи 4, яка використовується для проведення вимірювань. Кутонір змонтований на округлій основі 1 та скріплений з круговою шкалою – лімбом 2, де за допомогою важеля із зубчатою передачею рухається накривка 3, зі шкалою ноніуса 4 та скляною лінзою, яка дозволяє більш точно зняти показники приладу. Накривка кріпиться до основи за допомогою гвинта, який дозволяє закріпити одну із двох лінійок з пазами, в які входить шпонка. До основи кутоміра прикріплена пластина з фіксованим проміжком 3 мм між пластинами. В проміжок між цими двома гвинтами за допомогою мікрогвинта 5 приєднана одна (жорстко фіксована) з двох вимірювальних баз кутоміра, яка виконана у вигляді невеликої лінійки зі скосом 6. Вимірювання проводиться контактним методом. Точне встановлення при вимірі кутів забезпечується мікрометричною подачею, шляхом обертання гайки з накаткою, розташованою з тильної сторони кутоміра. Фік-

сація виконуються за допомогою стопорного пристосування. Перевага оптичного кутоміра полягає у можливості вимірювання кутів, розмірів їх сторін, всіляких складних контурів шляхом різних комбінацій окремих вимірювальних ланок кутоміра (змінні лінійки, що додаються до кутоміра мають різні скоси на кінцях, що дозволяє вибрати найбільш зручну схему вимірювань).

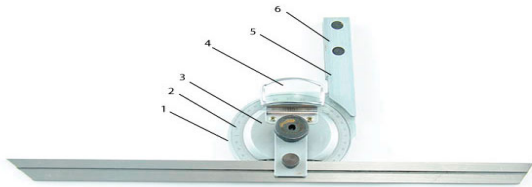


Рис. 6. Оптичний кутомір

До третьої групи також відносяться і рівні оскільки мають кутову шкалу, нанесену на дузі кола. Чутливим елементом таких рівнів є скляна ампула з рідиною. Рівні служать для вимірювання малих кутових відхилень від горизонтальної площини.

Четверту групу становлять прилади, застосування яких ґрунтується на визначенні розміру сторони прямокутного трикутника (при постійному розмірі іншої сторони) й обчисленні за тригонометричними функціями синуса і тангенса значення шуканого кута (синусні та тангенсні лінійки) вимірювальні мікроскопи, координатно-вимірювальні машини, спеціальні пристрої і т. п.

Інструментальні мікроскопи призначені для вимірювання оптико-механічним методом кутових та лінійних розмірів різних деталей складної форми – різбового ріжучого інструмента, черв'ячних фрез, лекал, кулачків, фасонних профілів тощо [9]. Вимірювання відбувається як тригонометричним методом, який полягає у визначенні лінійних розмірів, пов'язаних з вимірюваним кутом тригонометричною функцією, так і за допомогою кутомірної окулярної головки⁵.

Найбільш точними оптичними приладами для безконтактного вимірювання кутів є *гоніометри* і призначені вони для вимірювання кутів між плоскими гранями, що добре відбивають світлові промені. Вимірювання кутів можливе як на непрозорих, так і на прозорих тілах.

Для вимірювання кутів деталей великих габаритів в машинобудуванні використовується *лазерне обладнання* – досить точне, зручне та просте в експлуатації. Працює воно за принци-

пом напрямку променя на точку. Але частіше таке обладнання використовується в будівництві.

Висновки. Отже методи і методики вимірювання кутів, які застосовуються при контролі деталей, вузлів, інструментів та ін. дуже різноманітні і залежать від:

допустимої похибки вимірювань, визначеної конструкторською документацією;

діапазону вимірювань (області значень, в границях яких нормовані допустимі границі похибки);

конфігурації об'єкта, що вимірюється;

умов вимірювання (температура, вологість, атмосферний тиск, вібрації й ін.);

якості засобів вимірювання та їх вартості.

За принципом роботи і особливостями конструкції всі запропоновані моделі можна розділити на:

механічні (транспортні кутоміри, універсальні кутоміри з ноніусом) – максимально точний та компактний інструмент для вимірювання зовнішніх і внутрішніх кутів;

синусні та тангенсні лінійки, які служать для точних вимірювань кутів непрямым методом;

маятникові кутоміри – використовується для отримання точних вимірювань в інструментальному виробництві;

оптичні – мають спеціальну лінзу, для проведення більш точних вимірювань;

ділильні головки – максимально точний інструмент, але використовується тільки з допоміжними пристроями;

інструментальні мікроскопи – призначені для вимірювання оптико-механічним методом кутових та лінійних розмірів різних деталей складної форми;

лазерні – переважно для вимірювань габаритних деталей;

електронні або цифрові – мають дисплей з показниками вимірювань, що полегшує роботу оператора;

жорсткі кутові міри (кутники, конусні калібри, тощо) які є скоріше шаблонами, ніж повноцінним вимірювальним інструментом.

Варто знати, що основним принципом вибору засобів вимірювань є те, що точність засобу вимірювання повинна бути вищою у порівнянні із заданою точністю виконання вимірюваної величини, а трудомісткість виконуваних вимірювань та їх вартість – по можливості низькими, але такими, що можуть повністю забезпечувати високу продуктивність та ефективність виконуваних робіт. Отже, важливо оцінити переваги та недоліки методів та засобів вимірювання кутів та конусів і зробити зважений висновок у виборі різних видів кутовимірювальних інструментів відповідно до розмірів і допусків, заданих конструктором, при виготовленні деталей.

⁵ Кутомірною окулярною головкою складається із корпусу, на якому змонтовані окуляр, маховик, відліковий мікроскоп і дзеркальце. Цю головку застосовують для лінійних і кутових вимірювань. Всередині корпусу головки є скляна пластина зі штриховою сіткою та лімба, розмічений по колу на 360 рівних поділок. Пластина зі штриховою сіткою і лімба градусної шкали жорстко з'єднані між собою та мають спільний центр обертання, який знаходиться на оптичній осі мікроскопа. Штрихову сітку спостерігають у центральній окулярній мікроскопа, а градусну та хвилинну – у відліковій кутомірній мікроскоп.

Список літератури:

1. ДСТУ ISO/TS 9002:2017 Системи управління якістю. Настанови щодо застосування ISO 9001:2015.
2. Технічні вимірювання. Кутові вимірювання. URL:<https://studfile.net/preview/5730200> (дата звернення: 26.10.2024).
3. Безвесільна О.М., Ткаченко С.С. Аналіз складових похибки вимірювання кутів високоточним вимірювачем кута. URL:[cyberleninka.ruhttps://cyberleninka.ru › article›analiz-skladovih-poh](https://cyberleninka.ru/article/analiz-skladovih-pohibki) (дата звернення: 26.10.2024).
4. Черепанська І.Ю., Безвесільна О. М., Сазонов А. Ю. Прецизійна інтелектуальна гоніометрична система // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019 URL:http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2019_2_3 (дата звернення: 29.10.2024).
5. Черепанська І.Ю., Прецизійна приладова система вимірювання кутів: URL:[kpi.uahttps://ela.kpi.ua › bitstream › Cherepanska_diss](https://ela.kpi.ua/bitstream/Cherepanska_diss) (дата звернення: 26.10.2024).
6. Кузнецов Ю.М. Роль науки в розвитку цільових механізмів і верстатного оснащення в Україні. URL:[ztu.edu.uahttps://library.ztu.edu.ua › Process_obrobky_5_1](https://library.ztu.edu.ua/Process_obrobky_5_1) (дата звернення: 26.10.2024).
7. Засоби вимірювання кутів та конусів. URL:[BukLib.buklib./nethhttps://buklib.net › books](https://buklib.net/books) (дата звернення: 28.10.2024).
8. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання. Вимірювання кутів та конусів. URL:[tsatu.edu.uahttps://elib.tsatu.edu.ua › mtf](https://elib.tsatu.edu.ua/mtf) (дата звернення: 26.10.2024).
9. Вимірювання лінійних та кутових розмірів деталей на інструментальному мікроскопі. URL:[studfile.nethhttps://studfile.net › page:3](https://studfile.net/page/3) (дата звернення: 26.10.2024).
10. Методи вимірювання та контролю конічних поверхонь. URL:[pto.org.uahttps://turner2.pto.org.ua › tu](https://turner2.pto.org.ua) (дата звернення: 26.10.2024).
11. Кутомір: різновиди інструменту. URL:[montagnik.comhttp://montagnik.com › tehnika](http://montagnik.com/tehnika) (дата звернення: 28.10.2024).

Pavlenko V.Ya. CHOICE OF METHODS AND TOOLS FOR MEASURING ANGLES AND CONES IN THE PRACTICE OF CONTROL OF PARTS AND PRODUCTS IN THE FIELD OF INSTRUMENT AND MECHANICAL ENGINEERING

A large number of important modern scientific and industrial problems involve various measurements of mechanical quantities, in particular angles. High-precision (precision) angular measurements are necessary in many fields of science and technology, starting with the development and manufacture of parts, assemblies and products for industrial, transport, military and household needs, construction, geodesy, radio and laser location, and ending with astronomy, navigation and space systems. At the same time, the fields of use of angle measuring tools are constantly expanding, and the quality of angle measuring tools is constantly improving. This is due to the high requirements of modern production for the quality of products and works related to the manufacture and control of parts, assemblies and finished products.

The development of existing and creation of new methods for measuring angles and cones is impossible without analyzing the level of progress achieved, their types and quality of approaches. The choice of measuring instruments is determined by the measured value, the adopted measurement method and the required accuracy of the measurement result. The same metrological task can be solved with the help of different measuring instruments, which have not only different costs, but also different measurement accuracy and other metrological indicators, and, accordingly, give different measurement results. Measurements using an instrument of insufficient accuracy are of little value, even harmful, as they can lead to incorrect conclusions. And the use of too accurate measuring instruments is economically unprofitable. Therefore, when choosing the means and methods of controlling the measurement of angles and cones, the measurement range of the measured value, accuracy class, requirements of the design documentation, measurement conditions, operational measuring instruments and their cost are taken into account.

The article discusses the methods and means of measuring angles and cones in parts and products of instrument and mechanical engineering, the manufacture of precision tools and measuring equipment, the design and creation of precision mechanics products, etc. The types of angle measuring devices (instruments) were analyzed, each field of their application was explained, the expediency of using certain angles was substantiated, and recommendations were given regarding their choice depending on the conditions of the design documentation, the technological process, the purpose and design of the products. Methods and tools for measuring angles and cones are presented.

Key words: angles, cones, goniometric measurements, angle measuring devices, protractors, measurement error, accuracy class.

Павленко В.Я.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА НА ПІДПРИЄМСТВІ

В сучасному суспільстві метрологічне забезпечення (далі МЗ) виробничої діяльності відіграє величезну роль. Стрімкий розвиток науки і промисловості, нові сучасні розробки та новітні технології стимулюють удосконалення вимірювальної техніки, оскільки без вимірювань та без постійного підвищення їх точності неможливий розвиток жодної з галузей промисловості. Результати вимірювань є основою щодо ухвалення відповідальних рішень, тому вони мають бути точними, достовірними і своєчасними незалежно від того, де, коли та хто їх виконав. Тому забезпечення єдності й необхідної точності вимірювань, досконалість методів та засобів вимірювальної техніки (далі ЗВТ), постійна підтримка сучасного науково-технічного і упереджувального розвитку областей вимірювання, виходячи з потреби народного господарства країни, принципово можливо тільки за умови реалізації комплексу постійно діючих заходів. Всі ці заходи стимулюють різноманітну та цілеспрямовану діяльність широкого кола фахівців (метрологів, конструкторів, технологів, матеріалознавців, тощо).

Само по собі МЗ включає визначення раціональної номенклатури вимірюваних характеристик і параметрів. Для цього необхідно забезпечити технологічні процеси атестованими стандартними методиками, які повністю б гарантували необхідну точність вимірювань, а також забезпечити виробничі процеси стандартними і нестандартними засобами вимірювань, засобами обробки і засобами надання отриманої при вимірюванні інформації. Для забезпечення високого рівня вимірювань не досить мати теоретичну базу та ЗВТ – необхідно також вміти правильно користуватись ними.

В роботі розглянуті наукові, технічні та організаційні основи МЗ виробництва, які впливають на якість продукції (виробів) на виробничих підприємствах. З метою метрологічного забезпечення виробництва для виконання якісних вимірювань того чи іншого параметра, характеристики продукції, процесу чи явища, наведені етапи технологічних процесів. Досліджені питання забезпечення єдності вимірювань на етапах розробки, виробництва та випробувань продукції а також принципи вибору точності засобів вимірювань.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, продукція, виробництво, вимірювання, єдність вимірювань.

Постановка проблеми. МЗ підприємства – це діяльність направлена на встановлення наукових, технічних і організаційних основ для метрологічної підтримки діяльності підприємств, раціонального використання вимірювального обладнання, обґрунтування та досягнення необхідної точності та єдності вимірювань.

МЗ підготовки виробництва – це комплекс організаційно технічних заходів, які забезпечують визначення з необхідною точністю характеристик виробів, напівфабрикатів, вузлів, матеріалів, сировини, параметрів технологічних процесів і обладнання, що дозволяє досягти значного підвищення якості продукції, що випускається – та уникнути непродуктивних витрат на її розробку та виробництво. Відповідно, перед тим, як запустити виробництво необхідно дуже серйозно підійти до питання щодо організації МЗ. Варто виділити важливість значущих параметрів, визначити,

як їх контролювати, знайти надійних постачальників сировини та матеріалів, забезпечити гідні умови праці, розробити відповідні технологічні процеси.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема метрологічного забезпечення виробництва займаються багато українських та зарубіжних вчених. В.М. Остапчук, Л.А. Тимофеева, Л.Г. Комарова, Н.М. Можарова визначили основні принципи організації метрологічного забезпечення якості продукції та послуг [2]. Л.М. Сусліков, І.П. Студеняк у своїх дослідженнях особливу увагу приділили розгляду похибок вимірювань, джерел їх виникнення та методів зменшення їхнього впливу на кінцевий результат вимірювань [3]. В.О. Федорович, Л.І. Пупань, Є.В. Отсроверх роз'яснили принципи метрологічного забезпечення як складової частини системи контролю якості продукції [4]. В.М. Кропівний,

А.В. Кропивна, Л.А. Молокост надали методичні рекомендації щодо законодавчих та нормативних основ розробки та складання науково-технічної документації в частині метрологічного забезпечення [5].

Але, як було наголошено вище, сьогоденні реалії вимагають високої якості продукції та послуг від будь-якого підприємства, незалежно від його організаційно-правової форми. Тому питання метрологічного забезпечення є актуальним і вимагає додаткового вивчення.

Постановка завдання. Як уже відомо, на етапі підготовки виробництва підприємство проводить цілий комплекс організаційних і технічних заходів, які повинні забезпечити характеристики і параметри із заданою точністю, забезпечити комплексне метрологічне обслуговування і повірку ЗВТ та створити належні умови для здійснення вимірювань. Виходячи з цього виникає необхідність підготовки виробничого персоналу і співробітників та відповідних служб до проведення контрольних вимірювальних заходів, яким варто організувати проведення експертизи та метрологічного контролю конструкторської і технологічної документації. Всі перелічені положення є своєрідним ланцюгом, вилучення з якого будь-якої ланки неминуче призведе до отримання сумнівної (не достовірної) інформації, і, як наслідок, до значних економічних втрат і прийняття помилкових рішень.

Метою статті є поглиблення набутих спеціальних знань про методи теоретичних і емпіричних досліджень, структуру МЗ, наукові, нормативні та організаційні компоненти цього забезпечення. Основним завданням є систематизація набутих та надання спеціальних знань з метрології, сертифікації та контролю якості продукції у такому об'ємі, який би задовольняв попит у сучасному народно-господарському комплексі України.

Виклад основного матеріалу. Основною задачею метрологічної служби підприємства є стандартизація фізичних величин та вимірювань (іншими словами встановлення відповідності з еталонами). Створюється вона у відповідності з вимогами законодавства і виконує різні види робіт, пов'язані з єдністю вимірювань, а саме:

- координацію і керівництво роботою різних підрозділів підприємства, які направлені на забезпечення єдності та необхідної точності вимірювань;

- впровадження сучасних засобів і методів вимірювання, стандартів та інших нормативних документів, які регламентують норми точності вимірювань, метрологічні характеристики ЗВТ,

методи і засоби повірки, вимоги до МЗ і виготовлення нових видів продукції;

- розробку перспективних і річних планів робіт метрологічної служби, створення заявок та придбання необхідних ЗВТ, укладення договорів на розробку та впровадження нової вимірювальної техніки і здійснення контролю за їх виконанням;

- проведення метрологічної експертизи технічної документації на нові види продукції та вибір (за результатами експертизи) ЗВТ і методики виконання вимірювання, які здатні забезпечити істинний контроль технологічних процесів і якості продукції;

- розробка, сумісно з проектно-конструкторськими, конструкторськими і технологічними організаціями завдань на проектування ЗВТ для даного підприємства та здійснення МЗ при створенні і випробуванні нових виробів;

- здійснення контролю за станом и збереженням ЗВТ, які знаходяться у всіх підрозділах підприємства, правильністю використання методик виконання вимірювань і аналізуванням якості сировини та напівфабрикатів, якістю монтажних робіт та налагоджування ЗВТ;

- складання планів і календарних графіків ремонту та повірки ЗВТ, які підлягають обов'язковій державній або відомчій атестації в організаціях державної або відомчої метрологічної служби і контроль за їх виконанням;

- організація ремонту ЗВТ силами підприємства, використання обмінного фонду ЗВТ;

- визначення необхідності використання підприємством еталонів, стандартних зразків, складу і властивостей речовин та матеріалів;

- проведення метрологічних випробувань не стандартизованих ЗВТ, які виготовлені в одиничних екземплярах або разовими партіями для потреб підприємства;

- організація підготовки та підвищення кваліфікації робітників підприємств, які пов'язані з МЗ при виготовленні продукції;

- представлення у вищій організації та територіальні органи Держстандарту України відомостей щодо діяльності метрологічної служби підприємства та сприяння органам Держстандарту України і відповідним організаціям міністерств і відомств при здійсненні ними державного нагляду і відомчого контролю за МЗ розробок, виробництва і випробувань продукції дослідних зразків і діяльності метрологічної служби підприємства [1].

Отже МЗ включає наукову, технічну, нормативну та організаційну основи.

Науковою основою МЗ є метрологія – наука про вимірювання, про методи та засоби забезпечення

єдності вимірювань і способи досягнення потрібної точності.

Нормативну основу МЗ становлять нормативні документи, що визначають зміст і організацію виконання робіт, спрямованих на єдність вимірювань.

Технічною основою МЗ є вимірювальна техніка.

Організаційною основою МЗ є, як уже говорилося, метрологічна служба.

Можна із впевненістю сказати, що МЗ виробництва охоплює всі стадії життєвого циклу продукції (далі ЖЦП) відповідно до стандартних вимог, починаючи від сировини і закінчуючи готовою продукцією, що реалізується. Забезпечення усіх необхідних вимог неможливо без ефективної організації стадій ЖЦП, що випускається. Визначення ЖЦП і типовий зміст робіт на його стадіях встановлюють державні стандарти відповідно до яких весь ЖЦП поділяють на чотири стадії: наукове дослідження і проектування; виготовлення продукції; обіг продукції; споживання (експлуатація) й утилізація продукції. ДСТУ 3278-95 [18] встановлює визначення життєвого циклу продукції та його стадій.

Розглянемо більш детально зміст робіт на кожному етапі. Створення будь-яких промислових виробів починається з розробки конструкторської документації. Конструкторський документ (далі КД) окремо чи разом з іншими документами визначає склад і конструкцію виробу та містить необхідні дані, згідно з якими розробляють, виробляють, контролюють, приймають, постачають, експлуатують та ремонтують виріб. Рівень виконання КД значною мірою впливає на скорочення строків створення та впровадження у виробництво виробів, зниження трудомісткості їх виготовлення, підвищення надійності та якості.

Таким чином на *стадії розробки* (наукове дослідження і проектування) продукції технічний контроль полягає у перевірці технічної документації, відповідності дослідного зразка технічному завданню, правилам оформлення конструкторської документації, викладеним в ЄСКД (Єдина система конструкторської документації) ДСТУ 3321:2003 [19].

Стадія розробки продукції є найважливішим етапом, тому цей етап необхідно розглянути більш детально:

– *вхідний контроль* сировини та комплектувальних виробів, які надходять від постачальників є дуже важливим етапом на цій стадії. На багатьох підприємствах до цього відносяться формально і не приділяють належної уваги. Але саме цей етап є визначальним для усіх подаль-

ших стадій процесу виробництва. Від якості сировини та комплектувальних виробів залежить і якість кінцевого продукту. Якщо ми заощадимо на цьому етапі, то, не виключено, що прийдеться понести збитки на подальших стадіях виробництва, щоб усунути брак або, і взагалі, уникнути утилізації виробів [6]. Аналіз МЗ на цьому етапі включає встановлення правильності організації вхідного контролю у відповідності з вимогами ДСТУ 9037:2020 [20];

– *розробка технічного завдання* (в тому числі пошукові дослідження, вивчення досягнень науково-технічного прогресу, тощо). Це документ, що встановлює основне призначення, показники якості виробу, техніко-економічні та спеціальні вимоги до нього та до обсягу, стадій розроблення і складу КД. Технічне завдання для дослідно-конструкторських робіт (ДКР) виконується згідно з ДСТУ 3974–2000 [21]. Технічне завдання до конструкторських документів не належить;

– *вивчення вимог споживачів, постачальників* [7], *ринку сбуту, можливостей самого підприємства* [8];

– *вивчення умов при яких продукція повинна функціонувати* на подальших стадіях, а саме:

– матеріально-технічні ресурси (виробниче обладнання, інструмент, інвентар, оснащення, енергоресурси, основні та допоміжні матеріали);

– технологічні ресурси (технологічні процеси, конкурентоспроможні ідеї, наукові розробки, тощо);

– трудові ресурси (керівники, спеціалісти, технічні виконавці й робітники);

– просторові ресурси (виробничі приміщення, територія підприємства, мережі тощо);

– ресурси організаційної структури підприємства і системи його управління (характер і гнучкість управлінської системи, швидкість проходження управлінських дій, рішень, заходів, тощо);

– інформаційні ресурси (інформація про виробничу систему та зовнішнє середовище);

– фінансові ресурси (активи, пасиви, ліквідність, наявність кредитних ліній, тощо);

– підприємницькі здібності як особливий вид людського ресурсу, який, приводить в рух і організовує взаємодію всіх інших видів ресурсів виробничої системи [9];

– *підготовка технічної документації* – це визначення вимог до якості продукції, стандартів, правил виконання робіт і функціонування всього підприємства. Ця стадія означає, що виготовлена продукція або її складові надійні, безпечні і відповідають всім державним нормативам і стандартам;

– виготовлення дослідних зразків та проведення випробувань [10];

– випробування дослідних зразків – експериментальне визначення кількісних або якісних характеристик властивостей об'єкта випробувань за результатом впливу на нього під час моделювання чи функціонування [11].

На *стадії виготовлення* технічний контроль охоплює не тільки якість сировини та продукції (сертифікати і паспорти на сировину та комплектувальні матеріали після проходження вхідного контролю), а й перебіг виробничих процесів. Необхідно звернути увагу на забезпеченість виробничих ділянок і, в першу чергу, робочих місць відділу технічного контролю контрольно-вимірювальними приладами і придатністю та терміном дії їх застосування. Перш за все це стосується не стандартизованих ЗВТ (скоби, калібри, пробки-калібри, різьбові кільця, шаблони, тощо), які розроблені та виготовлені в одиничних екземплярах для потреб підприємства і знаходяться в експлуатації. При аналізі МЗ процесу виготовлення деталей та вузлів необхідно приділяти особливу увагу стану технологічного оснащення (штампи, прес-форми, технологічні пристосування, тощо). Контроль технічного обладнання на технологічну точність проводиться з метою визначення готовності технологічного обладнання на відповідність розробленій документації. Необхідно також проводити перевірку стану і правильності застосування ЗВТ. Для встановлення раціональної номенклатури вимірюваних параметрів, технологую (розробнику технологічних процесів виготовлення виробів) необхідно надати наступну інформацію: значення допусків на ті параметри, які передбачається оцінювати при контролюванні виробів; числові характеристики розподілу значень параметрів в межах заданих значень.

Для отримання потрібної точності вимірювань при контролюванні якості продукції, технологічних процесів, порівнянні результатів контролю у постачальника і споживача продукції необхідно використовувати атестовані методики виконання вимірювань¹.

Метрологічна служба підприємства виконує роботи по забезпеченню не тільки єдності і необхідної точності вимірювань, але і якості продукції, що виготовляється на всіх стадіях ЖЦП. Для цього крім Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [13] необхідно керуватись:

– вимогами ДСТУ ISO 9001 [14], де сказано, що вимірювальні процеси є важливим елементом забезпечення якості продукції на етапі її виготовлення².

– «Типовим положенням про метрологічні служби», в якому описані основні функції, права та обов'язки осіб, відповідальних за забезпечення єдності вимірювань на підприємствах, в установах та організаціях [15].

– «Настановою з якості підприємства» розробленою на підставі ДСТУ ISO 10005:2019 [16], в якій описується система якості метрологічної служби підприємства. Тобто по кожному елементу системи якості встановлюється ціль діяльності та відповідальні особи. Визначається основна діяльність щодо управління цими елементами. Вказані стандарти підприємства, які включають всі види діяльності, які повинні, з однієї сторони відповідати вимогам Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [13] та ISO 9001:2015 [17], а з іншої сторони – враховувати специфіку підприємства.

Отже на етапі виробництва продукції основними цілями МЗ є: підтримка заданих параметрів і властивостей продукції в процесі її виготовлення; контроль стану технологічного устаткування й оснащення; облік і раціональне використання енергоресурсів у споживача; приймальний контроль продукції на ділянках виробництва й заводських лабораторіях; випробування (визначення фактичних характеристик, параметрів, властивостей продукції в межах заданих умов, що впливають на виготовлення продукції).

В рамках МЗ виробництва проводиться метрологічна експертиза конструкторської та технологічної документації згідно МІ 1325-86 [22], метою якої є аналіз і оцінка технічних рішень щодо вибору параметрів, які підлягають вимірюванням, встановленню норм точності та забезпеченню методами та засобами вимірювань процесів розробки, виготовлення, експлуатації та ремонту виробів.

При проведенні метрологічної експертизи конструкторської та технологічної документації часто повторюються одні й ті ж самі помилки. Для того, щоб уникнути їх, необхідно проводити заходи щодо систематики і аналізу відповідних помилок, а також щодо підвищення метрологічного рівня спеціалістів інших відділів (конструкторського,

¹ Методика виконання вимірювань – це сукупність конкретно описаних операцій і правил, виконання яких забезпечує отримання результатів вимірювання із встановленими показниками точності.

² Для визначення МЗ рівня якості нових виробів використовується вимірювальний (об'єктивний) метод, який визначає оцінку рівня якості продукції за допомогою стендових випробувань та вимірювань з використанням приладів або лабораторного аналізу. Цей метод застосовується для вимірювання абсолютного рівня якості засобів виробництва.

технологічного, випробувального, метрологічного). Також необхідно мати кваліфікований персонал і постійно проводити роботи щодо підвищення його кваліфікації.

Отже метою метрологічної експертизи конструкторської й технологічної документації є: її організація; доказ можливості виготовлення продукції необхідної точності й існування відповідних ЗВТ; перевірка рівня стандартизації обраних ЗВТ; оформлення результатів метрологічної експертизи технічної документації.

На стадії експлуатації МЗ проводиться перевірка дотримання вимог експлуатаційної та ремонтної документації. На цій стадії виконуються наступні види робіт: дослідження продукції в процесі експлуатації для поліпшення її споживчих властивостей; визначення фактичних параметрів для підтримки технічних засобів виробництва, випробування, дослідження й контролю в нормальному експлуатаційному стані; проведення планово-запобіжного ремонту й контроль над станом устаткування; технічна експертиза інструмента, перевірка ЗВТ і т.д. Отже це гарантія забезпечення максимальної якості продукції під час експлуатації споживачем.

Одним із головних показників ефективної організації стадій ЖЦП є оцінка рівня метроло-

гічного забезпечення, діючого на підприємстві на всіх етапах ЖЦП [12].

Висновки. Таким чином взаємозв'язок якості та вимірювань є нерозривним, особливо в сучасних умовах глобалізації світової економіки. Зміни в підходах до забезпечення якості, в управлінні технологічними процесами та вимірювальною інформацією істотно впливають на рівень МЗ підприємств. Одним із найважливіших факторів МЗ є єдність вимірювань при розробці, виробництві та випробуваннях виготовленої продукції, тобто знання основних принципів точності вимірювань фізичних величин, методів та засобів забезпечення єдності вимірювань і способів їх досягнення.

Отже, обґрунтований вибір методів та засобів вимірювання при розв'язанні конкретної вимірювальної задачі, оцінка точності та похибок отриманих результатів вимірювання та відповідні знання про систему забезпечення єдності вимірювань є запорукою ефективності МЗ на підприємстві, і гарантією підвищення якості та конкурентоздатності українських товарів. Для підвищення ефективності метрологічної діяльності на підприємстві важливо інтегрувати МЗ в процесі управління якістю.

Список літератури:

1. Володарський Є.Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. URL: <https://metod.vntu.edu.ua/getfile.php> (дата звернення: 06.11.2024).
2. Остапчук В.М., Тимофеева Л.А., Комарова Л.Г., Можарова Н.М. Метрологічне забезпечення якості продукції, Харків 2008 URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/8500/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9.pdf> (дата звернення: 06.11.2024).
3. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Метрологія та вимірювання : навч. посіб. – Ужгород: Говерла, 2014. – 292 с. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/45061> (дата звернення: 06.11.2024).
4. Федорович В.О., Пупань Л.І., Отсроверх Є.В. Метрологічне забезпечення якості продукції. Вимірювальна техніка та метрологія, № 70, 2009 р. с 160-164 URL: https://vlp.com.ua/files/29_33.pdf (дата звернення: 06.11.2024).
5. Кропивний В.М., Кропивна А.В., Молокост Л.А. Науково – технічна документація: методичні рекомендації до вивчення курсу. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/items/6a8b90fa-248a-463e-86da-9c5ee22c434c> (дата звернення: 06.11.2024).
6. Кузьменко Т.М. Роль входного контролю в управлінні якістю продукції при виготовленні спецтехніки. URL: <http://tech.vernadskyjournals.in.ua> (дата звернення: 06.11.2024)
7. Шканова О.М. Маркетингова товарна політика: Навч. посіб. – 2-ге вид., стереотип. – К.: МАУП, 2003, 160 с.
8. Маслак О. І., Безручко О. О., Маслак М. В. Управління інноваційним потенціалом підприємства в умовах циклічності // Економіка і організація управління. – 2014. – Вип. 1-2. URL: http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=eiou_2014_1-226 (дата звернення: 06.11.2024).
9. Організація виробництва. Державний університет "Житомирська політехніка" URL: <https://learn.ztu.edu.ua/mod/resource/view> (дата звернення: 06.11.2024).
10. Випробування(техніка) URL <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення: 06.11.2024).
11. Випробування приладів і систем. Види випробувань та сучасне обладнання: навчальний посібник / В. В. Аврутов, І. В. Аврутова, В. М. Попов; НТУУ «КПІ». – Київ : НТУУ «КПІ», 2009. – 64 с.

12. Васілевський О.М., Ігнатенко О.Г., Присяжнюк В.В. Методика оцінювання метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки з урахуванням концепції невизначеності. Вісник інженерної академії №1, 2016.
13. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»
14. ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги.
15. ТИПОВЕ ПОЛОЖЕННЯ про метрологічні служби центральних органів виконавчої влади, інших державних органів, органів управління об'єднань підприємств, підприємств, установ та організацій, які виконують роботи у сфері законодавчо регульованої метрології. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 16 січня 2016 р. за № 79/28209.
16. ДСТУ ISO 10005:2019 Управління якістю. Настанови щодо програм якості (ISO 10005:2018, IDT)
17. ISO 9001:2015 «Системи менеджменту якості. Вимоги».
18. ДСТУ 3278-95 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення.
19. ДСТУ 3321:2003. Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять
20. ДСТУ 9027:2020 Системи управління якістю. Настанови щодо вхідного контролю продукції.
21. ДСТУ 3974–2000 «Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення».
22. МІ 1325-86 «Метрологія. Метрологічна експертиза конструкторської та технологічної документації. Основні положення і завдання.

Pavlenko V.Ya. EFFECTIVENESS OF METROLOGICAL SECURITY OF PREPARATION OF VIBRATIONS IN INDUSTRIES

In modern society, metrological support of industrial activity plays a huge role. The rapid development of science and industry, new modern developments and the latest technologies stimulate the improvement of measuring technology, because without measurements and without constant improvement of their accuracy, the development of any industry is impossible.

Measurement results are the basis for making responsible decisions, so they must be accurate, reliable and timely, regardless of where, when and who performed them. Therefore, ensuring the unity and necessary accuracy of measurements, the perfection of methods and means of measuring technology, constant support of modern scientific and technical and preventive development of the areas of measurement, is fundamentally possible only under the condition of the implementation of a complex of permanent measures. All these measures stimulate diverse and purposeful activities of a wide range of specialists (metrologists, designers, technologists, material scientists, etc.).

MH itself includes the definition of a rational nomenclature of measured characteristics and parameters. To do this, it is necessary to provide technological processes with certified standard methods that would fully guarantee the required measurement accuracy, as well as to provide production processes with standard and non-standard measuring instruments, processing tools and means of providing information obtained during measurement. To ensure a high level of measurement, it is not enough to have a theoretical framework and FEA – you also need to be able to use them correctly.

The paper examines the scientific, technical and organizational bases of metrological support of production, which affect the quality of products of manufacturing enterprises. For the purpose of metrological support of production to perform quality measurements of one or another parameter, product characteristics, process or phenomenon, the stages of technological processes are given. The issues of ensuring the unity of measurements at the stages of development, production and testing of products, as well as the principles of choosing the accuracy of measurement tools, are studied.

Key words: *metrological support, products, production, extinction, uniformity of measurements.*

Тінтурін С.Г.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У МОНІТОРИНГОВИХ СИСТЕМАХ ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Штучний інтелект є одним з найбільш перспективних новітніх напрямів технологій, що стрімко розвиваються впродовж останніх двадцяти років. За останні десять років алгоритми штучного інтелекту змогли значно вплинути на всі сфери людського життя, включаючи сферу моніторингу стану навколишнього середовища з метою охорони довкілля. Під час моніторингу стану навколишнього середовища системи штучного інтелекту аналізують величезні обсяги даних із різних джерел, таких як супутники, датчики та дрони, щоб у режимі реального часу давати актуальну інформацію для спеціалістів у сфері охорони довкілля. У цій статті проведено огляд питання застосування моделей штучного інтелекту у моніторингових системах охорони навколишнього середовища, який допоміг краще зрозуміти принципи їх роботи та недоліки, які вони мають. Для цього було проаналізовано праці українських та іноземних дослідників, які підтвердили актуальність обраної теми. Результати поточного дослідження виявили, що інтеграція алгоритмів штучного інтелекту в процес моніторингу навколишнього середовища забезпечує трансформаційні переваги в різних областях, включаючи відстеження якості ґрунту, води та повітря, управління дорожнім рухом і відстеження вуглецевого сліду. Все це робить значний внесок в охорону навколишнього середовища, захист здоров'я населення та сталий розвиток суспільства. Для майбутніх досліджень в цьому напрямі існує критична потреба зосередитися на етичних наслідках і кількісній оцінці впливу технологій штучного інтелекту на довкілля. Розробка стандартизованих методів оцінки екологічного сліду систем моніторингу на основі штучного інтелекту та дослідження етичних аспектів їх запровадження сприятимуть відповідальному та безпечному використанню цих технологій, підвищуючи їх популярність і ефективність у галузі моніторингу довкілля.

Ключові слова: штучний інтелект, екосистема, обмеженість природних ресурсів, системи моніторингу, зміни клімату.

Постановка проблеми. Процес моніторингу стану навколишнього середовища полягає у систематичному спостереженні за його компонентами, вимірюванні основних показників та комплексній оцінці складових. Головною метою цього процесу є контроль поточного стану та своєчасне виявлення змін, що можуть загрожувати екосистемам та здоров'ю населення. До традиційних методів моніторингу належать статистичний і лабораторний аналіз, а також ручний відбір проб [1]. Проте ці методи мають певні обмеження: висока вартість, тривалість процедур та низька точність результатів.

Значні витрати на ручний відбір проб та лабораторні аналізи часто є невиправдано високими, оскільки включають оплату праці кваліфікованих фахівців, а також вартість обладнання та хімічних реагентів [2]. Це спричиняє вузьку спрямованість багатьох програм моніторингу, оскільки вони використовують невеликі вибірки, що не дає повного уявлення про стан довкілля.

Забезпечення регулярного моніторингу навколишнього середовища стає надзвичайно складним завданням, особливо у регіонах з обмеженими

ресурсами, зокрема там, де бракує технологічної інфраструктури та досвіду [3].

Штучний інтелект є надзвичайно важливим елементом сучасного процесу моніторингу навколишнього середовища, оскільки підвищує об'єктивність результатів та полегшує доступ до регіонів, що страждають від дефіциту ресурсів. В екологічних моніторингових системах штучний інтелект застосовується для прогнозування стихійних лих, контролю якості повітря і води, а також виявлення забруднювачів [4].

Все вищеприписане підкреслює актуальність і необхідність подальших досліджень щодо застосування штучного інтелекту в системах охорони навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування штучного інтелекту у моніторингових системах екологічного нагляду розглянуто значною кількістю вітчизняних і зарубіжних дослідників, що підтверджує актуальність теми. У даній роботі проаналізовано лише найактуальніші з наукових праць, присвячених цьому напрямку.

Дослідженням технологічних рішень у сфері екології, зокрема із застосуванням технологій штучного інтелекту, присвячені роботи В. Скиби, М. Ганчука та Е. Аюбової, де зокрема виділено модель моніторингу та прогнозування кліматичних змін DeepMind [5].

Значний внесок у вивчення автоматизації виробничих процесів і моніторингу через IoT-технології, які базуються на алгоритмах штучного інтелекту, зробив С. Шабетя. Він зазначає, що такі підходи сприяють мінімізації шкідливих викидів і відходів, що є важливим аспектом для збереження довкілля [6].

У роботі М. Фабрикатора та П. Яганова наведено результати досліджень щодо використання технологій штучного інтелекту у телекомунікаційних системах для моніторингу стану навколишнього середовища. Крім того, ними розроблено технічне рішення, яке дозволяє створювати додаткові системи моніторингу [7].

Застосування сучасних інформаційних систем, базованих на алгоритмах штучного інтелекту, сприяє зниженню негативного впливу на навколишнє середовище, що було виявлено у дослідженнях В. Данкевича, С. Данкевича та С. Лутковської [8].

Питанням використання штучного інтелекту в управлінні екосистемами, зокрема для моніторингу дикої природи, оцінки стану середовища існування, аналізу біорізноманіття та прогнозування стихійних лих, присвячені дослідження О. Chisom, Р. Biu, А. Umoh, В. Obaedo, А. Adegbite та А. Abatan [9].

На думку М. Ncube та Р. Ngulube, удосконалення систем моніторингу та управління довкіллям досягається завдяки інтеграції інструментів аналізу даних на основі алгоритмів штучного інтелекту, що вважається важливим напрямом розвитку [10].

Прогрес у сенсорних технологіях, IoT та методах машинного навчання, як підкреслили S. Ullo та G. Sinha, значно посилює ефективність інтелектуальних систем екологічного моніторингу [11].

Аналіз сучасних наукових джерел свідчить про високу актуальність застосування штучного інтелекту в моніторингових системах охорони довкілля, що викликає значний інтерес серед наукової спільноти як в Україні, так і за кордоном. Водночас ця тематика потребує поглиблених досліджень у зв'язку зі зростанням екологічних ризиків та швидкими темпами розвитку технологій штучного інтелекту.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є здійснення огляду застосування штуч-

ного інтелекту в системах моніторингу навколишнього середовища.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі дослідницькі завдання:

- здійснити аналіз моделей моніторингу довкілля, що функціонують на основі принципів штучного інтелекту;
- дослідити основні концептуальні засади, що лежать в основі моделей моніторингу довкілля;
- ідентифікувати та описати недоліки існуючих моделей моніторингу довкілля.

Виклад основного матеріалу. Штучний інтелект відкриває нові можливості для моніторингу навколишнього середовища, пропонуючи інструменти для ефективного аналізу даних та прогнозування екологічних показників. Під час вибору системи на основі штучного інтелекту для моніторингу навколишнього середовища важливо враховувати такі аспекти, як доступність даних, обчислювальні ресурси та наявний досвід. Деякі моделі штучного інтелекту потребують значних обсягів даних і потужних обчислювальних ресурсів для навчання, тоді як інші здатні працювати на менш об'ємних наборах даних із меншими обчислювальними витратами [12]. Машини опорних векторів (SVM) є ефективними для аналізу високовимірних даних та вивчення складних взаємозв'язків між змінними. Цю технологію можна застосовувати до різних типів даних, зокрема зображень і тексту. Наприклад, SVM було успішно використано для класифікації зображень, таких як виявлення вирубки лісів та ідентифікація видів тварин [13].

Для розв'язання задач регресії в екологічному моніторингу застосовують підтримуючу векторну регресію (SVR), що є варіантом SVM і забезпечує ефективне прогнозування параметрів стану довкілля.

Дерева рішень є відносно простими для навчання й інтерпретації, що робить їх зручними для роботи з різними типами даних. Вони часто використовуються для завдань, пов'язаних з виявленням і моніторингом процесів вирубки лісів, контролем якості повітря та води. Проте ці моделі можуть бути схильними до перенавчання, особливо під час обробки складних та зашумлених даних, і можуть демонструвати обмежені можливості при виконанні завдань з розпізнавання зображень чи обробки природної мови.

Однією з моделей штучного інтелекту, що знайшла широке застосування в екологічному моніторингу, є випадковий ліс (Random Forest, RF). Ця модель характеризується підвищеною стійкістю

до перенавчання в порівнянні з індивідуальними деревами рішень і здатна обробляти різні формати даних, включно з візуальними зображеннями та текстовою інформацією. Випадковий ліс демонструє високу ефективність у завданнях класифікації зображень, аналізу природної мови та прогнозування часових рядів. Водночас, попри свою надійність і гнучкість, RF вимагає значних обсягів оперативної пам'яті та потужностей обчислень, що може обмежувати його застосування у високонавантажених екосистемах.

Згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) є найбільш оптимальними для аналізу зображень і просторових даних завдяки здатності автоматично виділяти складні шаблони без необхідності ручного програмування. Це робить CNN придатними для моніторингу процесів, таких як вирубка лісів та ідентифікація фауни, що є важливими екологічними завданнями. Однак навчання CNN є ресурсомістким, потребує великих обсягів анотованих даних, і часто ускладнюється відсутністю адекватних наборів даних для візуального розпізнавання. Попереднє навчання CNN на даних із суміжних доменів дозволяє частково вирішити цю проблему, забезпечуючи адаптацію моделей до нових середовищ [14].

Повторювані нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN) є ключовими для опрацювання послідовних даних, що дозволяє їм з високою точністю прогнозувати часові ряди та виконувати аналіз природної мови. RNN забезпечують ефективне моделювання довгострокових залежностей у даних, що робить їх цінним інструментом для передбачення екстремальних погодних явищ і аналізу великих обсягів екологічних звітів [15].

Така диференціація методів штучного інтелекту демонструє їх адаптивний потенціал для розв'язання різних завдань у сфері моніторингу навколишнього середовища, підвищуючи точність та ефективність процесів аналізу екологічних показників.

Проте процес навчання повторюваних нейронних мереж (RNN) потребує значних обчислювальних ресурсів і великих обсягів даних. Для підвищення точності кліматичних прогнозів та моделювання змін у підземних водах були розроблені модифіковані моделі, такі як Convolutional Deep Long Short-Term Memory (CDLSTM).

Гібридні моделі, що поєднують переваги алгоритмів машинного й глибокого навчання, забезпечують високу точність та надійність у моніторингу навколишнього середовища. Завдяки їм можливо враховувати складні нелінійні зв'язки

між вхідними та вихідними змінними, що є важливим для детального аналізу екологічних процесів. Хоча гібридні моделі потребують більше часу на навчання та є складними для інтерпретації, їх продуктивність значно перевищує інші підходи при вирішенні складних завдань екологічного моніторингу.

Перспективним напрямом є розробка методу синтетичної надлишкової вибірки меншості, заснованої на глибоких нейронних мережах (SMOTEDNN), для прогнозування забруднення повітря, що додатково підтверджує високий потенціал штучного інтелекту в цій галузі.

Різні моделі штучного інтелекту, що застосовуються для моніторингу стану довкілля, характеризуються своїми сильними сторонами та обмеженнями, що узагальнено у таблиці 1.

Отже, моделі SVM і SVR демонструють високу ефективність при роботі з великовимірними даними та виконанні регресійних завдань, хоча їх застосування потребує значних обчислювальних ресурсів. Древа рішень вирізняються простотою та легкістю інтерпретації, однак мають тенденцію до перенавчання. Випадкові ліси забезпечують універсальність і надійність, водночас їхнє використання вимагає значної обчислювальної потужності. Згорткові нейронні мережі (CNN) оптимально підходять для завдань, пов'язаних із аналізом зображень, проте вони залежать від великих обсягів даних та потужних обчислювальних ресурсів. Повторювані нейронні мережі (RNN) ефективно опрацьовують послідовні дані, хоча також потребують значних ресурсів і застосування вдосконалених моделей, таких як CDLSTM, для розв'язання складних завдань прогнозування. Гібридні моделі забезпечують найвищу точність та надійність, однак їх навчання й інтерпретація є досить складними.

Висновки. Таким чином, інтеграція алгоритмів штучного інтелекту в процес моніторингу навколишнього середовища забезпечує трансформаційні переваги в багатьох областях, включаючи такі, як відстеження якості ґрунту, води та повітря, управління дорожнім рухом і моніторинг вуглецевого сліду. Ця інтеграція робить значний внесок в охорону навколишнього середовища в цілому, захист здоров'я населення та сталий розвиток суспільства. Системи моніторингу навколишнього середовища, створені на основі моделей штучного інтелекту є надзвичайно актуальними для держав, які відчувають обмеженість природних ресурсів, оскільки вони можуть допомогти ефективно управляти наявними запасами ресур-

Специфіка використання моделей штучного інтелекту для моніторингу навколишнього середовища, їх переваги та обмеження

Назва моделі	Специфіка використання моделі	Сильна сторона	Обмеження
SVM	Прогнозування шкідливого цвітіння водоростей в озерах та моніторинг якості повітря	Ця модель здатна обробляти великі обсяги даних, аналізувати складні взаємозв'язки між змінними та адаптується до різних типів даних, зокрема зображень і тексту, що дозволяє ідентифікувати обмеженість природних ресурсів.	Класифікація екосистем, обробка природної мови та прогнозування екстремальних явищ
Дерево рішень	Використовується для прогнозування та оцінки якості води у річкових системах	Легкість навчання та інтерпретації; здатність працювати з різними типами даних	Обмежена ефективність у складних завданнях моніторингу, таких як виявлення вирубки лісів та оцінка якості повітря
Випадковий ліс (RF)	Моделювання індексу якості повітря в міських районах та прогнозування лісових пожеж	Стійкий до перенавчання; поєднує прогнози кількох дерев, що дозволяє виявляти кліматичні зміни	Класифікація екосистем, обробка природної мови та прогнозування екстремальних явищ може вимагати додаткових обчислювальних ресурсів
Згортовка нейронна мережа (CNN)	Моніторинг стану коралових рифів та ерозії узбережжя	Здатність вивчати складні шаблони із зображень без явного програмування; оптимальна для класифікації зображень та аналізу просторових даних	Може мати обмеження у завданнях з виявлення вирубки лісів та ідентифікації видів тварин без додаткових анованих даних
Повторювана нейронна мережа (RNN)	Прогнозування повеней на основі даних про опади та моніторинг рівнів річкового стоку	Підходить для роботи з послідовними даними, такими як часові ряди та обробка природної мови; виявляє довгострокові залежності в даних	Обмежена точність у прогнозуванні екстремальних явищ без додаткового налаштування для складних даних
Гібридна модель	Комбінація CNN та RNN для точного прогнозування рівнів забруднення повітря та аналізу ефекту «міського теплового острова»	Поєднує сильні сторони CNN та RNN, що забезпечує вищу точність та надійність у прогнозуванні	Потребує значних обчислювальних ресурсів і є складною для навчання та інтерпретації при високих вимогах до точності моніторингу

Джерело: розроблено на основі [16]

сів. Для майбутніх досліджень в цьому напрямі існує критична потреба зосередитися на етичних наслідках і кількісній оцінці впливу технологій штучного інтелекту на довкілля. Розробка стандартизованих методів оцінки екологічного сліду

систем моніторингу на основі штучного інтелекту та вивчення етичних аспектів їхнього розгортання забезпечить відповідальне та безпечне використання цих систем, що зробить їх ще популярнішими в процесі захисту довкілля.

Список літератури:

1. Zhang C. Fundamentals of environmental sampling and analysis. John Wiley & Sons, 2024. p. 576. URL: <http://surl.li/biibtw>
2. Artificial intelligence and automated monitoring for assisting conservation of marine ecosystems: A perspective / E. M. Diritia et al. *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.918104> (date of access: 13.11.2024).
3. Application of the Artificial Neural Network and Support Vector Machines in Forest Fire Prediction in the Guangxi Autonomous Region, China / Y. Li et al. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2020. Vol. 2020. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/5612650> (date of access: 13.11.2024)
4. Artificial Intelligence Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review / S. Subramaniam et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 16. P. 9951. URL: <https://doi.org/10.3390/su14169951> (date of access: 13.11.2024).

5. Скиба В. П., Ганчук М. М., Аюбова Е. М. Перспективи використання штучного інтелекту в галузі екології: освітній, науковій та практичній діяльності. *Інформаційні технології у сфері захисту довкілля* : колективна монографія; за загальною редакцією Маєвського В., Приймака В., Ткачука Р.; за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 16-17 травня 2024 р.). Львів : ННБК «АТБ», 2024. С. 118-127. URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/17676/3/monograph_tep_%d0%a8%d0%86%2024_.pdf
6. Шабетя С. Смарт-виробництво: поєднання автоматизації, екології та кібербезпеки. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. Вип. 11. №. 39. С. 1121-1131. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-11\(39\)-1121-1131](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-11(39)-1121-1131) (дата звернення: 14.11.2024).
7. Фабрикатор М., Яганов П. Інтелектуальні технології телекомунікацій для систем моніторингу та оперативного інформування. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Вип. 339. №. 4. С. 97-101. DOI: [10.31891/2307-5732-2024-339-4-15](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-15) (дата звернення: 14.11.2024).
8. Данкевич В. Є., Данкевич Є. М., Лутковська С. М. Вплив інновацій та інтернету речей на підвищення економічної ефективності управління земельними ресурсами аграрних підприємств. *Актуальні проблеми економіки*. 2024. Вип. 5 №. 275. С. 41-49. DOI: [10.32752/1993-6788-2024-1-275-41-49](https://doi.org/10.32752/1993-6788-2024-1-275-41-49) (дата звернення: 14.11.2024).
9. Reviewing the role of AI in environmental monitoring and conservation: A data-driven revolution for our planet / Onyebuchi Nneamaka Chisom et al. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 21, no. 1. P. 161–171. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.2720> (date of access: 13.11.2024)
10. Ncube M. M., Ngulube P. Enhancing environmental decision-making: a systematic review of data analytics applications in monitoring and management. *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. №. 1. P. 1-21. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s43621-024-00510-0.pdf> (date of access: 13.11.2024)
11. Ullo S. L., Sinha G. R. Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 11. P. 3113. URL: <https://doi.org/10.3390/s20113113> (date of access: 13.11.2024).
12. Database Meets Artificial Intelligence: A Survey / X. Zhou et al. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tkde.2020.2994641> (date of access: 13.11.2024).
13. Comparison of Random Forest, Support Vector Machines, and Neural Networks for Post-Disaster Forest Species Mapping of the Krkonoše/Karkonosze Transboundary Biosphere Reserve / B. Zagajewski et al. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 13. P. 2581. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13132581> (date of access: 13.11.2024).
14. Ghorbani Z., Behzadan A. H. Monitoring offshore oil pollution using multi-class convolutional neural networks. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 289. P. 117884. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117884> (date of access: 13.11.2024).
15. Analysis of environmental factors using AI and ML methods / M. A. Haq et al. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16665-7> (date of access: 13.11.2024).
16. Artificial Intelligence in Environmental Monitoring: Advancements, Challenges, and Future Directions / D. B. Olawade et al. *Hygiene and Environmental Health Advances*. 2024. P. 100114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114> (date of access: 13.11.2024).

Tinturin S.G. APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENVIRONMENTAL PROTECTION MONITORING SYSTEMS

Artificial intelligence is one of the most promising new areas of technology that has been developing rapidly over the past twenty years. Over the past ten years, artificial intelligence algorithms have been able to significantly influence all areas of human life, including the field of monitoring the state of the environment for the purpose of environmental protection. When monitoring the state of the environment, artificial intelligence systems analyze vast amounts of data from various sources, such as satellites, sensors and drones, to provide real-time information for environmental professionals. This article provides an overview of the application of artificial intelligence in environmental protection monitoring systems, which helped to better understand the principles of their work and the shortcomings they have. For this, the works of Ukrainian and foreign researchers were analyzed, which confirmed the relevance of the chosen topic. The results of the current study found that integrating artificial intelligence algorithms into the environmental monitoring process provides transformative benefits in a variety of areas, including soil, water, and air quality monitoring, traffic management, and carbon footprint tracking. All this makes a significant contribution to environmental protection, public health protection and sustainable development of society. For future research in this direction, there is a critical need to focus on the ethical implications and quantifying the impact of artificial intelligence technologies on the environment. The development of standardized methods for assessing the ecological footprint of monitoring systems based on artificial intelligence and studying the ethical aspects of their deployment will ensure the responsible and safe use of these systems, which will make them even more popular for use in the field of ecology.

Key words: artificial intelligence, ecosystem, limited natural resources, monitoring systems, climate changes.

Топчій Н.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

**3D-СКАНЕРИ. ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА АНАЛІЗ
СУЧАСНОГО СТАНУ**

У даній статті проведено дослідження існуючих 3D-сканерів, завдань та головних напрямків використання 3D-технологій, історію виникнення та основні принципи роботи електронних 3D-сканерів.

Останнім часом технологічний розвиток в галузі лазерного 3D-сканування в промисловості та інфраструктурі є потужним інструментом, що дозволяє ефективно керувати та оптимізувати різні процеси. Потреба в передових технологіях стає все більш актуальною і однією з найбільш перспективних інновацій у цій галузі є 3D-сканування, за допомогою якого з'явилась можливість збирати інформацію, проектувати та виготовляти обладнання, а також виконувати технічне обслуговування та ремонт у промисловості. Однією з найважливіших переваг 3D-сканування є можливість швидко й точно вимірювати фізичні об'єкти, скорочуючи час і ресурси, необхідні для збору даних. Ця підвищена ефективність може бути застосована до ряду завдань, включаючи виробництво обладнання та запасних частин, а також обслуговування та ремонт існуючого обладнання. Також 3D-сканування можна використовувати для виявлення несправностей обладнання та надання детального розуміння необхідного ремонту. Цю інформацію можна використовувати для створення нестандартних деталей для ремонту, скорочуючи час простою та витрати.

3D-сканування наразі є найбільш передовим способом переведення фізичного об'єкта у цифровий формат, який допомагає суттєво оптимізувати виробничий процес. Сучасні 3D-сканери мають здатність проводити оцифрування різних об'єктів – від мікроскопічних деталей до габаритних об'єктів. Вони привабливі оптимальним співвідношенням ціни та точності, високою швидкістю вимірювань та можливістю автономної роботи. Технологія 3D-сканування знаходить застосування в багатьох галузях – автомобільній промисловості, машинобудуванні, медицині, ювелірній справі – там, де вона з успіхом вирішує завдання контролю геометрії та зворотного проектування.

Ключові слова: сканер, контроль якості, вимірювання, об'єкт вимірювання, метод, модель.

Постановка проблеми. Сучасний світ охопила глобальна тенденція стрімкого технологічного розвитку. Активне впровадження інновацій дозволяє більш ефективно виконувати завдання, підвищити якість роботи в усіх сферах людської діяльності, економити ресурси, забезпечити комфорт споживача та продуктивність праці, постійний і надійний доступ до інформації [1]. Тому задача застосування тривимірного сканування у виробничій сфері 3D використовується для контролю якості та покращення виробничих процесів. Воно дозволяє швидко та точно аналізувати геометричні параметри деталей, виявляти дефекти та оптимізувати виробничі лінії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових надбань за темою дослідження показав масштабність сучасних досягнень.

Дослідженням проблемних питань аналізування вимірювань твердості займалися такі вітчизняні науковці, як Дуфенюк О.М., Кальченко В., Пасов Г. та інші.

Серед закордонних досліджень заслуговують на увагу праці Г. Гросса, В. Гершеля.

Тривимірне сканування – технологія, яка бере початок у 60-х роках минулого століття. Основною метою розробки є перенесення ключових фізичних характеристик об'єкту цифрову модель. Необхідність у віртуальних формах з'явилась в результаті активного використання комп'ютерних технологій як у виробництві, і у повсякденному житті. Перші 3D-сканери випустила компанія Cyberware в 1991 році. Для їх виготовлення була використана лазерна технологія. В 1992 році 3D сканер, numerically controlled computer (NCC) і 3D-принтер були об'єднані фахівцями компанії Cyberscan. Найперші 3D сканери мали обмежений функціонал та були досить простими. Однак з роками пристрої вдосконалювалися, що дозволило деталізувати створювані моделі та суттєво покращити їхню якість. Поява лазера суттєво розширила спектр використання технології 3d-сканування:

військова промисловість, автомобілі та суднобудування, дизайн, медицина, дизайн і навіть кіно. Усі виміри виробляються пристроєм, який з допомогою датчиків зчитують інформацію про об'єкт, створюючи тривимірну модель.

Постановка завдання. Провести аналіз принципів реалізації існуючих технологій 3D-сканування, оцінити можливість якісного контролю геометричних параметрів деталей.

Виклад основного матеріалу. Перш ніж перейти до розгляду основного матеріалу дослідження, слід визначити, що таке 3D-сканер. Це пристрій, який призначений для швидкого аналізу фізичного об'єкта та створення точної комп'ютерної 3D-моделі. Принцип його роботи ґрунтується на обчисленні відстані до об'єкта за допомогою двох камер. На додаток до камер використовується підсвічування – світлодіодне або лазерне. 3D-сканери класифікуються як за формою виконання (стаціонарні та портативні), так і за сферами використання, в основному поділяючись на професійні та побутові.

Однією зі складових 3D технологій є методика 3D-сканування, яка дозволяє швидко і просто отримати цифрову модель необхідного виробу. Якщо коротко, 3D сканування об'єктів – це процес перетворення фізичної форми реального об'єкта в цифровий вигляд. При цьому зберігається текстура і навіть колір вихідного зразка. Таким чином, 3D-модель необхідного виробу можна отримати без зайвих зусиль. 3D сканування об'єктів допомагає підготувати необхідну модель до 3D друку і в ряді випадків може зіграти вирішальну роль в побудові цифрового виробу. Ключовим приладом в процесі 3D-сканування є 3D сканер – пристрій, що зчитує фізичні параметри об'єктів і створює на їх основі 3D-модель. 3D сканування об'єктів може виявитися корисним при проектуванні будь-яких складних елементів, 3D моделювання яких, вручну надзвичайно трудомістке. Зокрема, 3D-сканування доцільно застосовувати при моделюванні різних пристосувань, комплектуючих, основних і запасних частин. Часто воно використовується в разі відсутності креслень та іншої документації на виріб, а також при необхідності конверсії в цифровий вигляд фігурних поверхонь, включаючи художні форми і зліпки.

В цілому процес 3D сканування нагадує систему об'ємного зору людини. Процес отримання даних 3D сканером нагадує формування об'ємного зображення побаченого в мозку людини. Для цього 3D сканер порівнює два зображення, зміщених одна відносно одної. Точ-

ність побудови 3D моделі досягається за рахунок застосування додаткових технологічних прийомів, таких як періодичний спалах або підсвічування лазером.

Якщо справа стосується точності сканування, та вона залежить як від конкретного пристрою, так і від характеристик вихідного виробу. Тому цілком реально провести 3D сканування об'єктів від 1 см (з усіма дрібними деталями), максимальні габарити не обмежені. Для досягнення найкращої деталізації по завершенню процесу 3D-сканування, 3D модель може піддаватися додатковій доробці фахівцем. Таким чином, завдяки 3D-скануванню об'єктів цифрові моделі виходять практично бездоганними. Похибка для 3D сканування об'єктів з площею поверхні від 100 см² становить 1 мм і може бути усунена при подальшій доробці. 3D сканування великих об'єктів може бути реалізовано пакетною обробкою фотографій об'єкта з усіх боків.

Для того, щоб мати можливість застосувати скановану модель деталі для контролю її якості, необхідно перш за все забезпечити високу точність визначення координат точок деталі за високої роздільної здатності. Високоточне сканування забезпечують сканери метрологічного класу; висока точність вимірювання цих приладів напряму визначає їх високу ціну [2].

Пристрої для 3D-сканування дозволяють зняти багато обмежень, які є у традиційного вимірювального обладнання. Такі звичні для метролога інструменти, як шаблони, мікрометри, штангенциркулі коштують недорого, але відрізняються суб'єктивністю показань і не підходять для складних вимірів. Координатно-вимірювальні машини мають більшу точність, ніж 3D-сканери, але вони дорожчі, більш габаритні і вимагають спеціальної підготовки оператора. Оптичні системи контролю, до яких відносяться 3D-сканери, – найкраще рішення щодо співвідношення ціни та якості, оскільки вони забезпечують: швидкість вимірювань, високу точність оцифрування об'єктів складної геометрії, можуть працювати автономно, Прості в експлуатації. Завдяки 3D-сканеру істотно полегшується праця дизайнера, технолога, конструктора: виконання складних трудомістких вимірювань і створення дизайну з нуля йдуть у минуле.

Які ж завдання може вирішити процес 3D сканування? Перш за все це контроль якості, а саме можливість перевірки будь-яких геометричних параметрів, враховуючи вхідний та вихідний контроль, метрологічний контроль деталей та

виробничого оснащення. Також це реверс-інжиніринг виробів для оперативного отримання проектної документації та модернізації продукту, проектування та моделювання з метою прототипування та оцінки зовнішнього вигляду виробів, модернізації виробничих цехів та обладнання. З'являється можливість цифрового архівування будь-якого необхідного асортименту (наприклад, знятих із виробництва деталей). Моделі, що збережені у цифрових бібліотеках, можуть бути доступні віддалено з будь-якої точки земної кулі. Основний критерій вибору 3D-сканера – точність сканування. Високоточні пристрої (10–30 мкм) допоможуть отримати надзвичайний результат: вони здатні передавати в 3D найскладнішу геометрію поверхні з мінімальними похибками. Такі 3D-сканери застосовуються в реверс-інжинірингу, контролі якості, медицині, служать для оцифровки прес-форм, деталей пристроїв та ін. інженерні. Вибираючи 3D-сканер, слід враховувати дозвіл (деталізацію), тобто. ступінь дискретності, яка доступна під час оцифрування об'єкта. Максимально висока деталізація дозволяє відобразити у 3D-моделі найдрібніші елементи. Розмір об'єктів, що скануються, і, відповідно, мобільність 3D-сканера безпосередньо залежать від типу пристрою, який ви підбираєте. При оцифруванні деталей та об'єктів невеликих та середніх параметрів зазвичай використовують ручні сканери. Для захоплення складних виробів малих та середніх форм із дрібними деталями підходять стаціонарні сканери. Сканування великих об'єктів (будівель, споруд, комунікацій) виконується за допомогою наземних лазерних пристроїв (дальномірів). Вивчаючи функціональні можливості 3D-сканерів, необхідно звернути увагу на такі моменти, як умови використання, швидкість сканування, поверхню об'єкта сканування, кольоровість. Одним із найважливіших напрямків використання можливостей 3D-сканерів є перевірка точності виготовлення деталі. Для цього так само проводять сканування поверхонь деталі та визначають ступінь відхилення реальних розмірів від базових, тим самим визначаючи точність виробу

Виділяють два основні методи тривимірного сканування:

1. Контактний. Пристрій зондує предмет за допомогою фізичного контакту, поки об'єкт знаходиться на прецизійній повірочній плиті. Контактний 3D сканер відрізняється надточністю роботи. Проте, при скануванні можна пошкодити або змінити форму об'єкта.



Рис. 1. Контактний 3D-сканер

2. Безконтактний. Застосовується випромінювання або особливий світ (ультразвук, рентгеновські промені). В даному випадку предмет сканується через відображення світлового потоку [3].



Рис. 2. Контактний 3D-сканер

Контактний 3D-сканер – це пристрій, що має спеціальний щуп, який вивчає контури об'єкта і на основі цього буде його 3D-копію на екрані. Контактні сканери досить прості у використанні, володіють високою точністю і добре підходять для сканування об'єктів простих форм, наприклад, промислових деталей. Але їх застосування для об'єктів з більш складною геометрією, де, крім граней з чітко окресленими межами, є плавні лінії і переходи, буде вкрай незручним. Окрім того, цей спосіб створення цифрової моделі не підходить для роботи з великими текстурними об'єктами. Більш досконалим способом тривимірного сканування є безконтактний. Це пояснюється тим, що 3D-сканер також використовує ефект відбиття хвиль від поверхні об'єкта сканування. У результаті аналізу функціональних можливостей безконтактних 3D-сканерів, були виявлені основні їх переваги: використання 3D-сканерів дозволяє

швидше виводити товар на ринок і отримувати максимально точні моделі (що сприяє зменшенню браку); аналіз відповідності фізичних деталей заданим технічним вимогам; виявлення браку в інструментальному оснащенні і діагностування експлуатаційних проблем на ранніх стадіях виробництва; автоматизація виготовлення штампового оснащення в автомобільній промисловості; можливість контролю без руйнування зразка. [4].

У контактних сканерах основним робочим елементом є щуп, який послідовно переміщуючись по поверхні деталі визначає її загальну конфігурацію. Такі сканери мають високу точність, однак через необхідність контакту з досліджуваною поверхнею можливе псування деталі. Також сканування можливе тільки для нерухомих об'єктів і є досить повільним у порівнянні з іншими видами. Безконтактні сканери, на відміну від контактних, жодним чином не вносять зміни в геометрію деталі й розрізняються залежно від типу робочого проміння і технічного виконання. Розрізняють лазерні, оптичні, ультразвукові та інші сканери. При цьому найбільшою точністю вирізняються лазерні сканери, однак вони погано працюють для дослідження рухомих об'єктів. Оптичні сканери в роботі використовують більш безпечний лазер другого типу та добре відтворюють навіть рухомі тіла, можуть використовуватись для сканування людей. Однак для таких сканерів поверхня не може бути дзеркальною, прозорою або блискучою. Для сканування таких тіл їх попередньо покривають спеціальним матовим розчином. Ультразвукові сканери найбільш поширені в медичній галузі [5].

Сучасні технології сканування дозволяють досліджувати різні предмети незалежно від їхнього розташування (всередині приміщення або зовні), освітлення та габаритів. Робота з лазерним або спрямованим промінням дозволяє деталізувати моделі, використовуючи останні напрацювання. Габарити приладів для 3d-сканування є досить компактними, що робить його зручним для транспортування.

За технічним виконанням безконтактні сканери можуть бути портативні або стаціонарні. Портативні сканери мають меншу вартість та легші у використанні, немає прив'язки до робочого столу. Проте вони мають нижчу точність у порівнянні зі стаціонарними. Крім того, вима-

гають застосування спеціальних маркерів. Ці маркери перед скануванням необхідно розмістити на досліджуваній поверхні, за ними система буде визначати положення сканера в просторі. Однак маркери залишають сліди на отриманій моделі, чим зменшують її якість. Стаціонарні сканери мають масивну основу, найчастіше у вигляді триноги та оснащені маніпулятором. При цьому орієнтація в просторі сканованої голівки визначається положенням маніпулятора, і тому маркувати деталі на поверхні не треба. До того ж такі сканери мають значно більшу точність [5].

У більшості випадків точність скануючої системи описується в документації деяким числом, заданим в міліметрах або дюймах. Однак подібна інформація може дати лише дуже приблизне уявлення про характеристики системи. Справа в тому, що точність практично всіх 3d сканерів сильно залежить від умов вимірювання, від самого вимірюваного об'єкта і від його положення в просторі. Крім того, саме значення точності можна взяти як середню помилку вимірювання, як максимальну помилку вимірювання, або як параметр *std. dev.* (standard deviation) Гауссова розподілу помилок. Так що вказане в документації значення точності може відрізнятись від передбачуваного в рази [6].

При скануванні надто маленьких об'єктів виникають складності з фокусуванням структурованого підсвітки і зйомки відповідних ділянок камерами. Типовий розмір об'єктів, для яких ще можна застосовувати дані технології становить близько 10 мм. Сканування великих об'єктів також пов'язано з проблемою забезпечення структурованого підсвітки достатньої яскравості, а також із зростанням габаритів самої скануючої системи. Практичним обмеженням можна вважати розмір об'єктів в 10 м. Для сканування об'єктів інших діапазонів розмірів доцільно застосовувати скануючі системи засновані на інших принципах (електронні мікроскопи і лазерні далекоміри) [6].

Висновки. У роботі досліджено принципи дії та типи 3D-сканерів та методи роботи з отриманою інформацією. Наведено алгоритми роботи з детальним описом послідовності дій. Розглянуто галузі їх використання та переваги методів вимірювань. Проте перспективи подальших досліджень ґрунтуються на вдосконаленні алгоритму використання кожного методу з отриманою інформацією.

Список літератури:

1. Дуфенюк О.М., Марко О.І. Інноваційні технології 3D-сканування в криміналістичній діяльності «Порівняльно-аналітичне право» 2018, 1, с. 313-315. URL:<http://https://dSPACE.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234>

567890/2429/1/%D0%94%D1%83%D1%84%D0%B5%D0%BD%D1%8E%D0%BA%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%8F%201%202018.pdf (дата звернення: 11.11.2024).

2. Іванов С.В., Олійник П.Б., Застосування тривимірного сканування для контролю деталей машин. Прикладна геометрія та інженерна графіка, Том 1 № 106 (2024) URL: <http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/307897> (дата звернення: 11.11.2024).

3. Гривюк О., Технології 3D сканування. Інформаційно-комп'ютерні технології – 2018 (9). pp. 242-245. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/26995/1/%D0%93%D1%80%D0%B8%D0%B2%D1%8E%D0%BA%20%D0%9E..pdf> (дата звернення: 11.11.2024).

4. Бойко С.В. Автоматизація підготовки виробництва корпусних деталей методом зворотного інжинірингу. Вісник чернігівського державного технологічного університету № 2 (65), Чернігів, 2013, с. 24-29.

5. Кальченко В., Кологойда А., Пасов Г., Сіра Н., Зюзько Д., Пивовар Д. «Сучасні 3D-технології в машинобудуванні та автомобільному транспорті» Технічні науки та технології № 2(32), 2023 с. 33-41. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-33-41](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-33-41) (дата звернення: 11.11.2024).

6. Адитивні технології виробництва 3D-сканування. Електронний ресурс. URL: http://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/162378/mod_resource/content/0/3d_scan.pdf (дата звернення: 11.11.2024).

Topchii N.V. 3D-SCANNERS. PRINCIPLES OF OPERATION AND ANALYSIS OF THE CURRENT STATE

This article studies the existing 3D scanners, tasks and main directions of 3D technologies use, the history of their appearance and basic principles of electronic 3D scanners.

Recently, technological development in the field of laser

Recently, technological developments in the field of laser 3D scanning in industry and infrastructure have been a powerful tool that allows for effective management and optimization of various processes. The need for advanced technologies is becoming more and more urgent, and one of the most promising innovations in this area is 3D scanning, which has made it possible to collect information, design and manufacture equipment, as well as perform maintenance and repairs in industry. One of the most important advantages of 3D scanning is the ability to measure physical objects quickly and accurately, reducing the time and resources required for data collection. This increased efficiency can be applied to a number of tasks, including the production of equipment and spare parts, as well as the maintenance and repair of existing equipment. Also, 3D scanning can be used to identify equipment faults and provide a detailed understanding of the repairs required. This information can be used to create custom parts for repairs, reducing downtime and costs.

3D scanning is currently the most advanced way to digitize a physical object, which helps to significantly optimize the production process. Modern 3D scanners have the ability to digitize various objects, from microscopic parts to large objects. They are attractive due to their optimal price-to-accuracy ratio, high measurement speed, and the ability to operate autonomously. 3D scanning technology is used in many industries, including the automotive industry, mechanical engineering, medicine, and jewelry, where it successfully solves the problems of geometry control and reverse engineering.

Key words: scanner; quality control, measurement, measurement object, method, model.

Топчій Н.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

МЕТОДИ ТА СУЧАСНІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ВИРОБНИЦТВІ

У даній статті проведено дослідження методів забезпечення якості приладів, що відповідають сучасним технологіям, які мають бути якісними та безпечними.

Сучасне повсякденне життя пов'язане з великою кількістю складних механізмів, приладів інфраструктури та побуту. Забезпечення якості виробів, на які ми покладаємося, є пріоритетом виробників. Залежно від галузі застосування, виріб – злагоджена робота простих та складних механічних деталей та механічних деталей і електроніки. Виявлення дефектів механічних деталей, швидке їх виправлення або вилучення з виробничого процесу – завдання сучасних виробників, зацікавлених у випуску конкурентоспроможної продукції.

Контроль якості деталей на виробництві виконується контрольними – вимірювальними приладами: мікроскоп, дефектоскоп, товщиномір, аналізатор тощо.

З'ясовано, що застосування контрольних-вимірювальної техніки забезпечує два основні види контролю – руйнівний та неруйнівний. Кожний вид контролю дозволяє виявити та виправити недоліки, наявність яких небезпечна в експлуатації деталі у складі виробу: відхилення від розмірів, неякісне покриття, тріщини, невідповідна структура матеріалу тощо.

В залежності від складності механічної деталі, використовуються методи контролю якості: від найпростішого – візуальний контроль, до найсучаснішого – ультразвуковий.

Контроль якості, проведений контрольними-вимірювальними приладами повинен базуватися на вимоги, визначені державними та міжнародними організаціями стандартизації, відповідати нормативним вимогам стандартів ДСТУ, ІРС, ІСО тощо.

Визначено, що запровадження методів контролю сучасними засобами забезпечує отримання високоякісного продукту, безпечно та високотехнологічне виробництво.

Розвиток сучасного виробництва та технологій, вимагає постійного удосконалення державних нормативних документів контролю та розробки методів та засобів контролю якості у відповідності до міжнародних стандартів.

Стрімкий розвиток технологій та матеріалів вимагає удосконалення пристроїв контролю, які забезпечать гарантію якості як окремих деталей так і виробу в цілому.

Ключові слова: *якість механічних деталей, контроль якості, метод контролю, засоби контролю, руйнівний контроль, неруйнівний контроль.*

Постановка проблеми. Завдання кожного виробника будь-якої галузі полягає в отриманні якісного продукту. Ця задача виконується за рахунок дотримання норм та стандартів виготовлення механічних деталей – складових виробу відповідної галузі.

Підтвердження якості механічної деталі відбувається завдяки контролю якості виробу в цілому або деталізовано, спеціальними пристроями та інструментами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями отримання якісних виробів при використанні сучасних засобів контролю займалися вітчизняні науковці: Пуга П.П., Сусліков Л.М., Студеняк І.П., Геворкян Е.С., Мельник О.М. тощо.

Вітчизняні виробники контрольних-вимірювальних виробів: METRINCO, УКРІНТЕХ тощо.

Закордонні фірми-виробники приладів контролю якості: HORIBA (Японія), FLIR (США), DELTA OHM (Італія), EZODO (Тайвань) тощо.

Постановка завдання. Метою статті є визначення необхідності використання пристроїв контролю якості для виявлення недоліків та отримання високоякісних виробів за рахунок використання якісних складових – механічних деталей.

Необхідність удосконалення старих засобів перевірки та розробка нових, відповідно сучасним технологічним процесам та норм стандартів виготовлення виробів.

Виклад основного матеріалу. Високотехнологічні галузі виробництва такі як авіабудування, машинобудування, електротехнічна, космічна галузь тощо, випускають високоякісну продукцію

запроваджуючи системи контролю якості з відповідністю параметрам державних та міжнародних стандартів, що забезпечують високу якість, безпечність виробу та процесів його виготовлення, екологічність виробу та виробництва.

Зростання промислового виробництва, запровадження нових технологій, розробка нових матеріалів, сприяє розробці та випуску більш складної продукції. Відповідно з'являються нові види характеристик, що потребують ретельного контролю якості виробу, а особливо складових частин – механічних деталей. Ретельна перевірка та забезпечення якості кожної механічної деталі, гарантує якісний функціональний виріб. Окремий процес перевірки кожної деталі формує систему контролю якості вихідного виробу.

Міжнародна система якості формується відповідно серії стандартів ISO 9000 та ISO 14001. Дана серія стандартів не відноситься до певної галузі, є універсальною для будь-якої компанії. Однак, виконання вимог забезпечує високий рівень перевірки якості продукції та вплив її виробництва на навколишнє середовище. Вимоги до якості конкретних деталей, складових та виробів в цілому регламентуються технічною документацією, стандартом виробу тощо.

Перевірка якості деталей, вузлів, готових виробів, методи та засоби перевірки якості в Україні відповідають державним та галузевим стандартам.

Приклад деяких з них:

– ДСТУ 3021-95 – Випробовування і контроль якості продукції. Терміни та визначення.

– ДСТУ 8282:2015 – Вироби електронної техніки. Правила приймання.

– ДСТУ-Н 7918:2015 – Система технологічного підготовки виробництва. Настанови щодо вибирання засобів контролювання.

– ДСТУ-Н 7919:2015 – Система технологічного підготовки виробництва. Настанови щодо проектування систем і процесів технічного контролювання.

– ДСТУ 9027:2020 – Системи управління якістю. Настанови щодо вхідного контролю продукції.

Контроль якості кожної механічної деталі визначається проведенням контрольного випробування, яке виконується відповідними методами випробувань та приладами контролю з дотриманням вимог подальшої експлуатації.

Відповідно до ДСТУ 3021-95:

– контроль якості продукції – контроль кількісних і (чи) якісних характеристик властивостей продукції;

– система контролю – сукупність засобів контролю, виконавців і визначених об'єктів контролю, що взаємодіють згідно з правилами, які встановлені відповідними нормативними документами;

– методи контролю – правила використання певних принципів засобів контролю;

– засіб контролю – технічний пристрій, речовина і (чи) матеріал для проведення контролю.

Важливими критеріями високої якості деталей машин, механізмів, приладів є фізичні, геометричні та функціональні показники, а також технологічні ознаки якості, наприклад, відсутність неприпустимих дефектів; відповідність фізико-механічних властивостей і структури основного матеріалу і покриття; відповідність геометричних розмірів і чистоти обробки поверхні необхідним нормативам і т.п. [2].

За походженням дефекти механічних деталей поділяються:

– конструктивні – недосконалість розробки, помилка конструктора;

– виробничо-технологічні – виникають при виготовленні, зварюванні, різанні, паянні, клепанні, склеюванні, механічній, термічній та хімічній обробці тощо;

– експлуатаційні – виникають через певний період невідповідної експлуатації, недотримання технологічного обслуговування, корозії металу, зношення частин тощо.

Методи контролю механічних деталей поділяються:

– руйнівний;

– пошкоджуючий;

– неруйнівний контроль.

Руйнівний метод контролю вимагає пошкодження зразка: вирізки зразків та відбору проб, в свою чергу поділяється:

– металографія – дослідження структури металевої деталі;

– механічні випробування – для оцінки міцності та пластичності: розтягнення, вигин, ударну в'язкість тощо;

– хімічний аналіз матеріалу деталі.

Прилади контролю для перевірки якості деталі руйнівним методом:

металографія:

– відрізнi верстати серії Vaincut-M, L, HSS Plus тощо – використовується при необхідності отримання точних прецизійних різців і тонкого зрізу шару матеріалу, застосовується для широкого спектру матеріалів різної твердості, також, застосовуються при виробництві друкованих плат, в напрямках, де потрібні технології високої точності позиціонування координат різця, а також різця матеріалів без деформації;

– металографічний мікроскоп серії ОПТІКА, УІТ РМ-500 – мікроскоп світлого і темного поля для досліджень у відбитому світлі, та світлі що проходить;

– металографічний мікроскоп прямий серії УІТ MicroMet – для металографічних досліджень зразків деталей з металів та сплавів із застосуванням різних методів дослідження і контрастування;

механічні:

– універсальні портативні твердоміри серії ADL DU – вимірювання твердості, можливі методи вимірювання – ультразвуковий та динамічний;

– твердоміри стаціонарні автоматизовані за Роквеллом серії UIT HP – Автоматичний вимір твердості по 15 шкалах Роквеллу і Супер-Роквеллу при навантаженнях від 3 кгс до 150 кгс;

– модернізований твердомір Бринелля UIT HBW-1 – вимір твердості за методом Бринелля в діапазоні навантажень від 62,5 кгс до 3000 кгс. Автоматичне отримання відбитку;

– сервопривідні випробувальні машини серії UIT STM, UIT GTM – для всіх видів навантажень відповідно стандартів ASTM A370, ASTM E83, API 5L, API 5CT, ABS, DIN 50125, DIN 10002, ДСТУ ISO 6892-1:2019, ДСТУ ISO 6892-2:2020, ДСТУ 7305:2013, ДСТУ ISO 7438:2005 тощо;

– проектор вимірювальний UIT XT-12D – для оцінки геометричних параметрів деталей складної форми;

– копер маятники серії UIT IPT – для випробувань зразків деталей з високоміцних металів та сплавів на двоопорний вигін та зразків пластмас, щільного нейлону, скловолокна, кераміки для визначення поглиненої енергії;

– проектор оптичний UIT OP-50 – для оцінки геометричних параметрів деталей та виробів складної форми, зіставлення вимірюваних параметрів з документацією.

хімічний аналіз:

– аналізатор хімічного складу серії Inductar – для визначення вуглецю, сірки та кисню. Елементи аналізуються за допомогою ІЧ-детектора широкого спектру дії, який здатний визначати увесь діапазон концентрацій. Для точного визначення водню уперше використовується інноваційна технологія виявлення. Оснащений твердотілою високочастотною індукційною піччю, яка дозволяє досягти температуру зразка до 3000°C;

– спектрометри оптико-емісійні серії Metavision – для аналізу більше 55 елементів, включаючи С, N, O, Li, Na, S, P тощо, з низькими межами виявлення від 1 ppm., широка система діагностики, включаючи виявлення помилок, реєстрації і звітності;

– лазерні портативні аналізатори серії SciAps – визначають будь-які речовини, будь-якого сплаву, будь-якого елементу металевої деталі як в польових, так і в лабораторних умовах;

– рентгенофлуоресцентні аналізатори серії SciAps X – для вхідного контролю придбаної сировини, контролю якості продукції, забезпечення точності теоретичних розрахунків при проектуванні, проведення сертифікації продукції.

Пошкоджуючий метод контролю – це сукупність таких видів контролю, які проводяться безпосередньо на об'єкті, при цьому об'єкт зберігає працездат-

ність, але в місцях контролю лишаються непереборні сліди, які не перешкоджають експлуатації [2].

Види пошкоджуючого контролю:

– твердометрія – вимірювання твердості деталі чи виробу втискуванням інденторів, таких як алмазні наконечники, бабітові кульки тощо;

– стилоскопіювання – оцінка марки сталі за допомогою стилоскопу: утворення оптичного спектру вольтової дуги між електродом приладу та поверхні деталі чи виробу.

При проведенні контролю твердометрії можливе використання твердомірів, приладів які використовуються при механічних руйнівних пошкодженнях.

Прилади контролю стилоскопіювання:

– стилоскоп переносний СЛП-2 використовується для спектрального аналізу великогабаритних зразків, деталей агрегатів і машин без їх розбирання в пересувному режимі. Зразки можуть бути досліджені на місці розміщення завдяки високій мобільності приладу;

– стаціонарний стилоскоп «СПЕКТР» – виконує якісний та напівкількісний аналіз (використовуючи фотометричний клин) матеріалів у видимій області спектру.

Неруйнівний метод контролю (або дефектоскопія) – дає змогу перевірити якість продукції без порушення її придатності до використання за призначенням [1].

Неруйнівний метод контролю механічних деталей забезпечує:

– ефективний контроль на різних стадіях виробництва;

– контроль якості відповідно заданих параметрів;

– технічна доступність засобів контролю, простота методики в умовах виробництва;

– контроль сучасними засобами та можливість використання їх при різних умовах.

Види неруйнівного методу контролю:

– візуально-оптичний контроль – має велике розмаїття способів отримання первинної інформації про зовнішні дефекти деталі чи виробу незалежно від виду матеріалу, виявляє зовнішні дефекти, наявність яких виключає подальшу перевірку якості з застосуванням відповідних приладів;

– ультразвуковий (акустичний) – виявляють внутрішні та зовнішні дефекти – порушення суцільності (дефекти зварювання, пайки, склеювання), міжкристалічної корозії, неоднорідності структури деталей та виробів;

– капілярний – при застосуванні індикаторних рідин виявляються внутрішні порожнечі, термічні та шліфувальні тріщини в деталях з металів та неметалів простої і складної форми;

– радіохвильовий – для контролю деталей з матеріалів, на яких повільне згасання радіохвилі – напівпровідники, ферити, діелектрики (кераміка, пластмаса, скловолокно);

– тепловий – для визначення дефектів пайки багат шарових деталей з металів та неметалів, клейових з'єднань тощо;

– смісний – за допомогою зміни провідності, контролюють хімічний склад та несущільності пластмас, напівпровідників;

– термоелектричний – визначаються розтріскування в емалевих покриттях, вимірювання товщин плівкових покриттів, ступінь загартування деталі та при сортуванні деталей;

– магнітний – виявляє несущільність матеріалу, виявляє зміни магнітних характеристик феромагнітних сплавів;

– електромагнітний (вихрових струменів) – виявлення дефектів в магнітних і немагнітних деталях, на деталях складної конфігурації;

– радіаційний – визначають внутрішню будову матеріалу, внутрішні дефекти деталі та виробу, контроль зварних та паяних швів тощо. Вид випромінювання залежить виду деталі та завдань, що стоять перед контролем.

Прилади контролю неруйнівного методу перевірки якості:

візуально-оптичний контроль:

– інтелектуальні профілометри серії CHOTEST серії SJ57 – призначені для різьбових заготовок, дозволяють двостороннє сканування, отримання профілю об'єкта шляхом сканування поверхні Т-подібним стилусом та обчислення 2D геометричних розмірів та допусків на основі профілю. Програмне забезпечення аналізує параметри деталі, внутрішній та зовнішній діаметри, параметри профілю тощо;

– машини швидкого вимірювання серії VX8300 – використовує принцип візуального вимірювання, точні алгоритми аналізу зображень. Подвійна телецентрична подвійна лінза з високою глибиною різкості, дозволяє виконувати швидкі вимірювання деталей та виробів у галузях електроніки, машинобудування, при виробництві друкованих плат, роз'ємів, ріжучі інструменти, медичне обладнання, гуми, годинники, точне штампування тощо;

– відеоендоскопи Flasher 900, ARGUS 900, UIT VD VSE – 3100 – дозволяють проводити огляд важкодоступних порожнин, робити фото та відеофіксацію;

– вимірювач шорсткості (профілометр) TMR200 – вимірювані параметри: Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, Rv, R3z, R3y, RzJIS, Rsk, Rku, Rsm, Rmr, Rx;

ультразвуковий:

– ультразвукові товщиноміри серії ADL-UT, 27MG, 45MG, 38DL PLUS – використовується для оперативного вимірювання товщини деталей та виробів металевих і неметалевих, з великокристалічною структурою, схильних до корозії та ерозії. Можливість виміру через покриття. Діапазон вимірювання від 0,4 мм до 600 мм;

– ультразвукові дефектоскопи серії Olympus – дозволяють отримати та обробити масиви даних про стан деталей в галузях авіабудування, машинобудування тощо;

капілярний:

– пенетрант FLUXO P 139, пенетрант організмивний SKL-SP2, пенетрант водозмивний SKL-WP2 – рідини, які забезпечують яскравість малюнку для контролю деталей при візуальному огляді або реєструючим пристроєм. Широко використовуються при контролі відповідальних деталей в авіабудуванні, машинобудуванні, суднобудуванні тощо;

магнітний:

– дефектоскопи магнітні стаціонарні DA -750, DA -1500, магнетоскоп для вимірювання залишкової намагніченості 5-0-5, 10-0-10, 20-0-20 – дозволяє виявити найменші ушкодження та виправити їх. Допоміжними матеріалами є магнітні суспензії та ґрунти для магнітопорошкового контролю;

– магнітний товщиномір пластмас Olympus Magna Mike 8600\$;

електромагнітний:

– вихрові дефектоскопи серії Olympus з двочастотним режимом, підтримкою роторних сканерів, з функцією вимірювання провідності;

– вихрострумовий дефектоскоп ВД-43А – виявлення поверхневих дефектів деталей з феромагнітних і неферомагнітних металів та сплавів;

радіаційний:

– денситометри ZY-586, негатоскопи ZYVF-L10, ZY-D50 – забезпечують швидку діагностику дефектів та похибок, легко визначає оптичну щільність рентгенографічних знімків, мобільне використання в будь-яких умовах.

Як правило, руйнівний та пошкоджувальний методи контролю механічних деталей використовуються на експериментальних зразках деталей та виробів, в процесі відпрацювання документації та умов експлуатації з дотриманням відповідних вимог замовників та споживачів.

Неруйнівний контроль проводиться як на експериментальних зразках деталей при відпрацюванні розмірів, відповідності вибраного матеріалу, технології виробництва, так є обов'язковим при серійному виробництві з відпрацьованими технологічними процесами у відповідності до вимог стандартів відповідної галузі.

Висновки. Контроль якості механічних деталей в системі контролю якості виготовлення виробу – важливий етап для забезпечення високої продуктивності, надійності, безпеки та довговічності.

Методи контролю, забезпечені сучасними контрольно-випробувальними приладами дозволяють:

– виявити та усунути дефекти, що знижує ризику та економить ресурси;

– відповідають високим стандартам;

– мають високу якість;

- покращення репутації підприємства;
 - підвищена довіра клієнтів.
- Поєднання методів контролю якості механічних деталей, правильно організовані етапи контролю та забезпечення їх виконання відповідно удосконаленим стандартам якості з урахуванням новітніх технологій та матеріалів – запорука стабільності виробництва та гарантія якості виробу.

Список літератури:

1. Геворкян Е.С., Мельник О.М., НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ, Конспект лекцій, Харків – 2015р.
URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/2823/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9.pdf> (дата звернення: 21.11.2024).
2. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ Навчальний посібник для студентів фізико-технічних спеціальностей УЖГОРОД – 2016р.
URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/45064/1/%D0%9D%D0%95%D0%A0%D0%A3%D0%99%D0%9D%D0%86%D0%92%D0%9D%D0%86%20%D0%9C%D0%95%D0%A2%D0%9E%D0%94%D0%98.pdf> (дата звернення: 21.11.2024).
3. Неруйнівний контроль: досягнення та застосування в інспекції матеріалів і контролі якості Електронний ресурс. URL:<https://simvolt.ua/neruivnyi-kontrol-dosiahnennia-ta-zastosuvannia-v-inspektsii-materialiv-i-kontroli-yakosti/> (дата звернення: 21.11.2024).
4. УКРІНТЕХ. Електронний ресурс. URL: <https://ukrintech.com.ua/> (дата звернення: 21.11.2024).
5. TMC Academy. Електронний ресурс. URL: <https://academy.tms.ua/uk/blog-uk/standarty-iso-serii-9000/> (дата звернення: 21.11.2024).
6. Будстандарт онлайн. Електронний ресурс. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=82322 (дата звернення: 21.11.2024).
7. Діагностичні прилади – обладнання для неруйнівного контролю. Електронний ресурс. URL:https://dp-ndt.com.ua/about_us (дата звернення: 21.11.2024).

Topchii N.V. METHODS AND MODERN MEANS OF CONTROLLING MECHANICAL PARTS IN PRODUCTION

In this article, we study methods for ensuring the quality of devices that meet modern technologies, which must be of high quality and safe.

Modern everyday life is associated with a large number of complex mechanisms, infrastructure and household appliances. Ensuring the quality of the products we rely on is a priority for manufacturers. Depending on the field of application, a product is a coordinated work of simple and complex mechanical parts and mechanical parts and electronics. Detecting defects in mechanical parts, quickly correcting them or removing them from the production process is the task of modern manufacturers interested in producing competitive products.

Quality control of parts in production is performed by control and measuring devices: microscope, flaw detector, thickness gauge, analyzer, etc.

It has been found that the use of control and measuring equipment provides two main types of control – destructive and non-destructive. Each type of control makes it possible to identify and correct deficiencies that are dangerous in the operation of a part as part of a product: deviations from the dimensions, poor quality coating, cracks, inappropriate material structure, etc.

The implementation of modern control methods ensures high-quality products, safe and high-tech production.

The development of modern production and technologies requires continuous improvement of state regulatory control documents and the development of quality control methods and means in accordance with international standards.

The rapid development of technologies and materials requires the improvement of control devices that will ensure the quality of both individual parts and the product as a whole.

Key words: *quality of mechanical parts, quality control, control method, control means, destructive testing, non-destructive testing.*

Чайковський С.Ю.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

МЕТРОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ – ГАРАНТ ВИГОТОВЛЕННЯ ЯКІСНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Будь-яке виробництво продукції починається з розробки технічної і технологічної документації, яка описує процес виробництва і якість готових виробів (технічне завдання, технологічна інструкція, технічні умови, методики контролю та ін.). В переважній більшості вищезазначених документів фігурують кількісні показники якості виготовленої продукції, які потребують проведення вимірювань з отриманням кількісного виразу певних величин. Процес будь-яких вимірювань вимагає дотримання певних умов, які забезпечують достовірні виміри та не викликають сумніву в отриманих результатах.

Якість, а відповідно і надійність та довговічність виготовленої продукції залежать від показників якості характеристик закладених в конструкторській документації. В процесі виробництва продукції ці показники забезпечуються завдяки відпрацьованій технологічній документації і контролюються згідно метрологічній документації.

Єдиний підхід до вимірювань гарантує можливість уніфікації і стандартизації методів та засобів вимірювань та взаємного визнання результатів вимірювань. Для реалізації цього, результати вимірювань повинні бути виражені в узаконених одиницях, а похибки вимірювань не повинні виходити за встановлені межі із заданою вірогідністю. Всі ці умови забезпечують єдність вимірювань, правила і норми яких встановлені Законом України від 05.06.2014 № 1314-VII «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1].

В статті розглянуті законодавчі та рекомендовані директивні документи, які регламентують вимоги та надають рекомендації до проведення метрологічної експертизи технічної документації. Окремі задачі метрологічної експертизи а також умови, яким повинна відповідати розроблена технічна документація. Проведена паралель між метрологічним контролем та метрологічною експертизою в умовах виробництва і розтлумачена перевага проведення метрологічної експертизи документації при розробці та виготовленні виробів для забезпечення їх ефективної експлуатації.

Ключові слова: метрологія, метрологічний контроль, метрологічна експертиза, технічна документація, єдність вимірювань.

Постановка проблеми. Якість продукції, яка виготовляється на підприємстві забезпечується рядом факторів, а саме: конструкторською документацією; технологічними процесами та матеріалами; стабільним та атестованим технологічним обладнанням; засобами та методами вимірювань та випробувань, кваліфікованим персоналом.

Метрологічна експертиза усіх видів технічної документації забезпечує високу якість продукції, яка виготовляється на підприємстві. Основною проблемою є аналіз та оцінювання технічних рішень в частині забезпечення єдності вимірювань, яка потребує конкретизації задач метрологічної експертизи шляхом удосконалення технічної документації, а саме:

– впровадження у виробництво найбільш сучасних і прогресивних методів і засобів контролю, забезпечених технічно обґрунтованою точністю;

– зниження трудомісткості і собівартості контрольних операцій;

– відповідність застосовуваних у всіх підрозділах підприємства засобів і методів вимірювання, вимог оптимальних режимів технологічних процесів і контролю якості продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання метрологічного забезпечення, (далі МЗ) та метрологічного контролю, (далі МК) постійно вивчаються і вдосконалюються. Ванін В.В., Бліок А.В., Гнітецька Г.О., Морозенко О.П., Малишко Г.В., Грибанова Р.Ю. детально розглядають правила оформлення КД відповідно до вимог стандартів (кресленники окремих деталей, складальні кресленники, текстові документи) [16, 18]. Дубова С.В. розкриває базові нормативно-правові засади функціонування науково-технічної інформації, сутність науково-технічної діяльності та науково-технічної документації та її окремих складових: технологічної, конструкторської та наукової документації [17]. Терлецький Т.В., Кайдик О.Л.,

Ткачук А.А., Речун О.Ю. надають методичні рекомендації до правил оформлення конструкторської та проектної документації відповідно до вимог діючих стандартів [19]. Але законодавчі директивні документи щодо проведення МЕТД потребують ретельного пояснення і обговорення. Даний матеріал необхідний фахівцям різних галузей знань для реалізації відповідних проектних і конструкторських рішень.

Постановка завдання. Питання підвищення надійності і довговічності продукції як показника якості продукції необхідно розглядати на ранніх стадіях життєвого циклу шляхом метрологічної експертизи технічної документації (далі МЕТД).

МЕТД дозволяє вирішувати дві задачі:

– забезпечення якості виготовлення продукції, підвищення надійності та довговічності її в експлуатації;

– скорочення строків підготовки виробництва при освоєнні нових розробок.

Якщо задачі підвищення якості, надійності та довговічності продукції шляхом удосконалення ТД зрозумілі, то шляхи реалізації цих задач, в значній мірі, для спеціалістів різних рівнів вимагають роз'яснення. Метрологія є ланкою, яка зв'язує між собою наукові дослідження, розробку перспективних виробів, виробництво та впровадження цих виробів в економіку країни. Тому метою роботи є конкретизація задач метрологічної експертизи.

Виклад основного матеріалу. Насамперед МЕТД включає метрологічний контроль ТД, тобто перевірку на відповідність стандартам та іншим нормативним документам. В першу чергу здійснюється перевірка на відповідність використаних в документації метрологічних термінів (ДСТУ 3321:2003 [6]), одиниць фізичних величин (ДСТУ 2681-94 [9]), найменувань та позначень (ДСТУ 3651.0-97 [11]). Необхідно враховувати вимоги ДСТУ ГОСТ 2.001:2006 [4], ГОСТ 2.105-95 [12], ГОСТ 2.106-96 [13] в частині забезпечення вимог до виконання текстових документів на виробі приладів та машинобудування.

Основні види ТД, які підлягають МЕТД наведені в ДСТУ-Н РМГ 63:2013 [14]. Це технічні завдання, звіти по НДР, технічні умови, проекти стандартів, експлуатаційні та ремонтні документи, програми та методики випробувань, технологічні інструкції та регламенти, технологічні карти, проектна документація¹. В обов'язковому порядку метрологічній експертизі підлягає доку-

ментація, яка регламентує і містить метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки, (далі ЗВТ), які впливають на результати і похибки вимірювань, номенклатура яких регламентована ДСТУ OIML R 34:2014 [15].

ДСТУ-Н РМГ 63:2013 [14] визначає наступні основні задачі МЕТД: ідентифікацію об'єкта вимірювань та його параметрів; визначення оптимальної точності вимірювань; раціональний вибір ЗВТ та методики вимірювання; контроль метрологічних термінів, найменування вимірюваних величин і позначення їх одиниць. Окрім цього згідно ДСТУ-Н РМГ 63:2013 [14] при організації МЕ повинен бути розроблений документ який встановлює порядок проведення МЕ на конкретному підприємстві (стандарт підприємства). В цьому документі необхідно сформулювати наступні задачі МЕТД:

– визначення оптимальної номенклатури вимірюваних параметрів при контролюванні з метою забезпечення ефективності і достовірності контролю якості та визначення оптимальної номенклатури ЗВТ;

– встановлення відповідності показників точності вимірювань вимогам забезпечення оптимальних режимів технологічних процесів;

– встановлення правильності вимог до ЗВТ і методики вимірювання;

– встановлення відповідності показників точності вимірювання вимогам ефективності і достовірності контролю;

– виявлення можливості переважного застосування уніфікованих автоматизованих ЗВТ, які забезпечують отримання заданої точності вимірювання;

– оцінка вибору ЗВТ, які забезпечують мінімальну трудомісткість і собівартість контрольних операцій при заданій точності;

– встановлення правильності найменувань і позначень фізичних величин і їх одиниць;

– встановлення правильності проведення вимірювання в рамках забезпечення безпеки праці;

– оцінка забезпечення конструктивних рішень, технології виробництва, контролю необхідних параметрів в процесі виготовлення виробу, проведенні випробувань, експлуатації і ремонту (контролепридатність конструкції);

– встановлення переваг застосування стандартизованих методів вимірювання;

– визначення наявності стандартних або спеціальних програм обробки результатів вимірювання і відповідності вимог, пред'явлених до обробки результатів вимірювань а також до форми представлення результатів вимірювання, контролю, випробувань;

¹ В нормативних документах (стандартах підприємства), які встановлюють порядок проведення МЕТД на конкретних підприємствах перелік текстових документів може бути доповнений і вказаний більш конкретно.

– встановлення наявності і правильності вибору кліматичних умов проведення вимірювання;

– встановлення правильності застосування метрологічних термінів і визначень, позначень типів ЗВТ у відповідності до стандартів, технічним умовам і довідково-інформаційною документацією на них.

Слід зауважити, що основними документами щодо проведення МЕ є Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1], ДСТУ 2682-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологічне забезпечення [10].

Варто визначити і правове забезпечення МЕТД [8].

МЕТД здійснюють згідно з правилами і положеннями, регламентованими державними стандартами (ДСТУ), а саме:

– єдина система технологічної підготовки виробництва (ЄСТПВ);

– єдина система конструкторської документації (ЄСКД);

– єдина система технологічної документації (ЄСТД);

– галузеві стандарти (ГСТУ);

– стандарти підприємств (СТП) та іншою НТД.

Проводять МЕТД метрологічні служби підприємства (організації), а також конструкторські і технологічні підрозділи і служби стандартизації під методичним керівництвом і контролем метрологічної служби підприємства головних і базових організацій з метрології. Наукове і методичне керівництво роботою головних і базових організацій з експертизи документації покладені на Державну метрологічну службу України.

МК або МЕТД рекомендується проводити одночасно з нормоконтролем конструкторської і технологічної документації. Нормоконтроль проводить спеціальний нормоконтролер. При наявності необхідної НТД, що встановлює вимоги до метрологічного забезпечення проводять метрологічний контроль. Якщо така документація відсутня, то необхідна МЕТД.

Для розуміння розглянемо основні поняття:

Експертиза – дослідження спеціалістом (експертом) будь-яких питань, рішення яких потребує спеціальних знань в області науки і техніки.

Експертиза технічної документації – це комплекс питань, які направлені на удосконалення технічного рівня прийнятих рішень, організацій виробництва та покращення експлуатаційних властивостей продукції, що виробляється.

Стандартизаційна експертиза – таке поняття в літературних і довідкових джерелах відсутнє,

хоча проведення такої експертизи конструкторської і технологічної документації фактично є обов'язковим у відповідності зі стандартами, що регламентують нормоконтроль [2, 3].

Контроль конструкторської і технологічної документації – це ступінь оцінки відповідності трьох основних вимог: технічних, соціальних та економічних.

Метрологічний контроль конструкторської і технологічної документації – це оцінка технічних рішень щодо вибору параметрів, які підлягають вимірюванням, встановлення норм точності і забезпечення методами і засобами вимірювань процесів розробки, виготовлення, випробування, експлуатації та ремонту виробів. Цей контроль має чітко окреслену задачу і закінчується одним із висновків на альтернативному протиріччі типу «відповідає – не відповідає», «виконано – не виконано», «дотримано – порушено».

Метрологічна експертиза – це аналіз та оцінка правильності встановлення і дотримання ряду метрологічних вимог стосовно до об'єкту, що підлягає експертизі [15]. Більш повне поняття метрологічної експертизи можна сформулювати наступним чином – *метрологічна експертиза* – це аналіз і оцінка технічних рішень в частині метрологічного забезпечення, правильності вибору номенклатури вимірюваних параметрів, оптимальних норм точності, методів і засобів вимірювання та їх метрологічного обслуговування.

Метрологічна експертиза технічної документації – це аналіз і оцінка правильності прийнятих в документації технічних рішень щодо реалізації метрологічних норм і правил, іншими словами, аналіз і оцінка технічних рішень, щодо вибору параметрів, які підлягають вимірюванню, встановленню норм точності і забезпеченню методами і способами вимірювання процесів розробки, виготовлення, випробування, експлуатації та ремонту виробу.

Аудит технічної документації – це комплексна перевірка наявної документації щодо актуальності, достовірності, повноти, відповідності визначеним стилям та іншим попередньо встановленим критеріям і вимогам. Звіт про внутрішній аудит технічної документації надсилається безпосередньо керівництву та раді директорів і використовується для покращення процедур і внутрішнього контролю.

Технологічний аудит – комплексне обстеження підприємства з метою визначення його технологічного стану. Технологічний аудит проводиться відповідно до встановлених критеріїв і за певною

методикою, що гарантує комплексне і всеосяжне розкриття всіх складових процесу.

Із вищевикладеного витікає, що МК аналогічний нормоконтролю – тобто здійснює константу невідповідностей. Тоді як МЕТД крім виявлення невідповідностей дозволяє провести аналіз і, при необхідності, надати рекомендації щодо їх усунення.

Досить часто експерти підмінюють поняття метрологічного контролю метрологічною експертизою. Так, наприклад, більшість керівників вищої ланки, які відповідають за конструкторську документацію вважають, що кресленики (як складальні так і окремих деталей) не повинні піддаватися МЕТД. ДСТУ 3321:2003 [6], який визначає склад і конструкцію виробу та містить необхідні дані, згідно з якими розробляють, виробляють, контролюють, приймають, постачають, експлуатують та ремонтують виріб передбачає технологічний контроль і нормоконтроль, але не метрологічну експертизу. ДСТУ 3278-95 [7], який установлює терміни та визначення основних понять стосовно розроблення та поставлення продукції на виробництво інформує, що «експертиза технічної документації – це дослідження технічної документації щодо її відповідності встановленим вимогам».

В Законі України «Про метрологію та метрологічну діяльність» також немає чіткого положення щодо метрологічної експертизи. А саме:

Стаття 37. Метрологічна експертиза документації (технічних завдань, національних стандартів, конструкторської, проектної та технологічної документації тощо) здійснюється у порядку, встановленому національним стандартом з метрології [1]. Коментарі та зміни до Закону не вносять пояснень про порядок проведення метрологічної експертизи.

Виходячи з цього, діяльність підприємств, як приватних так і підпорядкованих державному регулюванню, при розробці технічної документації проходить МК.

Отже МЕТД на підприємстві є формою МК. Але слід зазначити, що проведення науково-технічної експертизи на виробі є набагато ширшим поняттям, ніж проведення МК, тому що під час науково-технічної експертизи оцінці підлягають: новизна досліджень, їх науково-технічний рівень та всі види забезпечення виробу, а не тільки метрологічне забезпечення. Така експертиза не проводиться на кожному етапі життєвого циклу, а, як правило, лише один раз і за участі провідних науково-дослідних установ, які здійснюють науково-технічне супроводження розроблення виробу. Так, проведення такої експертизи фактично є «важелем» Замовника для забезпечення якості та ефективності експлуатації виробів вже починаючи зі стадії задуму їх створення, розроблення та випробування. НТД на виріб є носієм

необхідної та достатньої інформації для безпосереднього використання його за призначенням на усіх стадіях життєвого циклу. Під час проведення МЕТД виявляють помилкові або недостатньо обґрунтовані рішення в частині метрологічного забезпечення виробу, відпрацьовують конкретні рекомендації щодо покращення якості МЗ. Проведення МЕТД сприяє вирішенню великої кількості техніко-економічних задач при розробленні технічної документації на виробі.

Іншими словами, проведення МЕТД на виробі є інструментом Замовника для оцінювання та покращення якості МЗ виробів на усіх стадіях їх життєвого циклу. Відмова від проведення МЕТД – часткова втрата відмінної якості виробів, що суперечить інтересам Замовника.

Відомо, що Розробник – це виконавець заходів МЗ на усіх стадіях його розроблення, а проведення МЕТД – контроль з боку Замовника за виконання Розробником усіх метрологічних вимог, які зазначені у ТТЗ (ТЗ). Адже Розробник не може водночас бути виконавцем метрологічних заходів і контролюючою стороною.

Дійсно, як зазначено вище МЕТД є формою МК, але слід розрізняти поточний метрологічний контроль (нормоконтроль), який проводить Розробник під час розроблення ТД, та МЕТД, яку проводить комісія Замовника, зазвичай, поєднуючи її з прийманням певного етапу ДКР.

Висновки. Проведення МЕТД на виробі є однією із складових науково-технічного супроводження розроблення (модернізації) виробів.

Проект технічної документації складається з трьох основних частин: конструкторської, технологічної та метрологічної документації, на підставі яких створюється, виробляється та контролюється продукція. Висока якість продукції забезпечується високою якістю проекту технічної документації. Метрологічна експертиза якості всіх трьох частин проекту продукції є гарантом високої якості продукції, що виробляється і відрізняється від МК глибиною контролю.

Таким чином перевагою проведення МЕТД є:

- виявлення доцільності застосування стандартизованих і уніфікованих засобів і методів виконання вимірювань;
- оцінювання рівня механізації і автоматизації використовуваних ЗВТ;
- необхідність розробки нових ЗВТ, контролю і випробувань, а також методів і засобів їх метрологічної перевірки;
- удосконалення методів контролю.

Отже в роботі доведено, що тільки тісний взаємозв'язок конструкторських розробок, технології і метрології є гарантом виготовлення виробів з високою якістю функціональних та експлуатаційних характеристик.

Список літератури:

1. Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII «Про метрологію та метрологічну діяльність».
2. ДСТУ 3008-2015 Нормоконтроль. Звіти у сфері науки і техніки.
3. ДСТУ ГОСТ 3.1116:2014 Єдина система технологічної документації. Нормоконтроль .
4. ДСТУ ГОСТ 2.001:2006 Єдина система конструкторської документації. Загальні положення.
5. ДСТУ ГОСТ 2.052:2006 Єдина система конструкторської документації. Електронна модель виробу. Загальні положення (ГОСТ 2.052-2006, IDT) з поправкою.
6. ДСТУ 3321:2003 Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять
7. ДСТУ 3278-95 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення
8. Метрологічна експертиза технічної документації StudFiles URL:<https://studfile.net> > preview > page:49 (дата звернення: 11.11.2024).
9. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення.
10. ДСТУ 2682-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологічне забезпечення.
11. ДСТУ 3651.0-97 Основні одиниці фізичних величин міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення.
12. ГОСТ 2.105-95 ЄСКД. Загальні вимоги до текстових документів.
13. ГОСТ 2.106-96 ЄСКД Текстові документи.
14. ДСТУ-Н РМГ 63:2013 Метрологія. Забезпечення ефективності вимірювання під час керування технологічними процесами. Метрологічна експертиза технічної документації (РМГ 63-2003, IDT)
15. ДСТУ OIML R 34:2014 Метрологія Класи точності засобів вимірювальної техніки.
16. Ванін В.В., Блюк А.В., Гнітецька Г.О. Оформлення конструкторської документації. Навчальний посібник. – К.: "Каравела", 2003. – 160 с.
17. Дубова С. В. Науково-технічна документація: Методичні рекомендації до вивчення дисципліни. / С. В. Дубова. – К.: «Центр учбової літератури», 2017. – 54 с.
18. Морозенко О.П., Малишко Г.В. Правила виконання та оформлення креслень: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. – 49 с.
19. Основи технічної документації [Текст]: Навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей / Терлецький Т.В., Кайдик О.Л., Ткачук А.А., Речун О.Ю.; під заг. ред. Терлецького Т.В. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2021. – 126 с.

Tchaikovskiy S.Yu. METROLOGICAL EXAMINATION OF TECHNICAL DOCUMENTATION – A GUARANTEE OF QUALITY PRODUCTS

Any production of products begins with the development of technical and technological documentation, which describes the production process and the quality of finished products (technical tasks, technological instructions, technical conditions, control methods, etc.). The vast majority of the above-mentioned documents contain quantitative indicators of the quality of manufactured products, which require measurements to obtain a quantitative expression of certain values. The process of any measurements requires compliance with certain conditions that ensure reliable measurements and do not raise doubts about the results obtained. A unified approach to measurements guarantees the possibility of unification and standardization of measurement methods and means and mutual recognition of measurement results.

The quality, reliability and durability of manufactured products depend on the quality indicators of the characteristics laid down in the design documentation. During the production process, these indicators are ensured by the proven technological documentation and controlled in accordance with the metrological documentation.

To implement this, measurement results should be expressed in legalized units, and measurement errors should not exceed the established limits with a given probability. All these conditions ensure the unity of measurements, the rules and norms of which are established by the Law of Ukraine dated 06.05.2014 No. 1314-VII "On metrology and metrological activity" [1].

The article examines legislative and recommended directive documents that regulate requirements and recommendations for metrological examination of technical documentation. The tasks of metrological examination are outlined, as well as the requirements that the developed technical documentation must meet. A comparison of metrological control and metrological examination in production conditions is given, and the advantage of conducting metrological examination of documentation during the development and manufacture of products to ensure their effective operation is explained.

Key words: metrology, metrological control, metrological examination, technical documentation, unity of measurements.

Шорнікова С.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ЯКІСТЬ ВИРОБНИЦТВА ДРУКОВАНИХ ПЛАТ. АНАЛІЗ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ

У даній статті проведено дослідження застосування електроніки у всіх сферах життєдіяльності людини. Електронна апаратура на великому підприємстві або примітивний побутовий пристрій, повинні якісно виконувати задачі, закладені в них розробником. Відповідальність за досконалу роботу будь-якого пристрою покладена на виробників, які повинні виконати замовлення якісно, відповідно документації та з дотриманням всіх державних та міжнародних норм і стандартів.

У статті розкрито процес виготовлення будь-якої електронної техніки, який починається з розробки та виготовлення друкованої плати, від її складності якої залежить від сфери застосування. Кожний етап у виробництві друкованої плати вимагає контролю, який повинен забезпечити надійність, технологічність та безпечність. Вибір матеріалу основи друкованої плати, метод нанесення провідного малюнка, захисне покриття плати – всі ці етапи виробництва повинні виконуватися на високоточному обладнанні з забезпеченням максимальної точності.

З'ясовано, що виконання цих вимог можливе при дотриманні вимог відповідно до державних стандартів – ДСТ України та міжнародних – ISO, IPC, IEC тощо.

Стандарти, на які базується виробництво друкованих плат включають широкий спектр вимог, зменшують витрати від нестандартних процесів, забезпечують якість та надійність, ефективнішу взаємодію між замовником та виробником. Отримання якісного виробу, де друкована плата є одним з основних складових, це виробництво з дотриманням норм та стандартів. Дотримання вимог відповідно нормативних документів забезпечує гарантію якості.

Випуск продукції відповідно міжнародних стандартів робить підприємство більш конкурентоспроможним на ринку виробників. Якість етапів виробництва друкованих плат, друкованих вузлів, монтажу виробу тощо, визначається стандартами розробленими державними та міжнародними структурами стандартизації.

Відповідно до того, як збільшуються вимоги до виду та якості плат, галузеві асоціації Сполучених Штатів, Європи, Азії активно сприяють розробці нових та вдосконаленню існуючих стандартів друкованих плат.

Ключові слова: електронна техніка, друкована плата, провідний малюнок, захисне покриття, державний стандарт, міжнародні стандарти ISO, IPC, IEC.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток електроніки вимагає від розробників нестандартних рішень у формах, методах конструювання та якісного виробництва як всього виробу так і окремих деталей та вузлів.

В свою чергу, розвиток нових технологій та матеріалів вимагає постійного корегування та розробку нових нормативних документів до вимог сучасного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливість розробки та виготовлення друкованих плат високої якості відповідно міжнародним стандартам, акцентували в своїх роботах такі вітчизняні науковці: Зінгер Ю.Л., Адаменко Ю.Ф., Яцюк Л.А., Косогін О.В. Євсіна Н.О., Дудник О.В. тощо.

Серед вітчизняних виробників друкованих плат з високою якістю виробництва завдяки

дотриманню міжнародних стандартів ISO, IPC тощо, можна відзначити компанії ДП «Гальванотехніка», «Віаком», VERIKOM, СК-ТЕХНО, РСВETAL тощо.

Закордонні фірми, якість виробництва яких підтверджена міжнародними стандартами: UET (Unlon Electronic Technology) – якість виробництва відповідає стандартам IPC – 610-D, Highleap Electronics, – усі процеси мають сертифікат ISO9001: 2015 тощо.

Постановка завдання. Метою статті є визначення необхідності виготовлення будь-яких видів друкованих плат відповідно норм міжнародних стандартів для отримання інноваційних електронних виробів, необхідність розробки нових стандартів відповідно до сучасних вимог виробництва друкованих плат.

Виклад основного матеріалу. Незалежно від того, де буде здійснюватися проектування, виготовлення, тестування друкованих плат, монтаж електронних компонентів, замовник повинен отримати якісний продукт. Високу якість друкованих плат та друкованих вузлів забезпечують компанії, виробництво яких відповідає встановленим законодавчим вимогам та підтверджене відповідно до державних та міжнародних стандартів.

Якість виробу – сукупність властивостей, що закладається в процесі конструкторської та технологічної розробки, наукових досліджень, виробничого циклу, а проявляється в процесі експлуатації.

Основними показниками якості виробництва електронної апаратури та друкованих плат зокрема є [1]:

- конструктивні – ступінь стандартизації, нормалізації, уніфікації, коефіцієнт складності, кількість блоків (комплектність), маса;
- надійності – технічний ресурс, термін служби, імовірність безвідмовної роботи;
- економічні – трудомісткість, собівартість, ціна;
- товарно-споживчі – споживана потужність, стійкість до зовнішніх впливів (температура, вологість, вібрація тощо).

Відповідно до закону України «Про стандартизацію» №1315-VII від 5.06.2014 року [2]:

- стандартизація – діяльність, що полягає в установленні положень для загального та неодноразового використання щодо наявних чи потенційних завдань і спрямована на досягнення оптимального ступеня впорядкованості в певній сфері;
- стандарт – нормативний документ, заснований на консенсусі, прийнятий визнаним органом, що встановлює для загального і неодноразового використання правила, настанови або характеристики щодо діяльності чи її результатів, та спрямований на досягнення оптимального ступеня впорядкованості в певній сфері;
- міждержавний стандарт – регіональний стандарт, передбачений Угодою про проведення узгодженої політики в галузі стандартизації, метрології і сертифікації від 13 березня 1992 року та прийнятий Міждержавною радою із стандартизації, метрології і сертифікації;
- міжнародний стандарт – стандарт, прийнятий міжнародною організацією із стандартизації і доступний для широкого кола користувачів.

Державні та галузеві (відомчі) службами стандартизації України:

– Держстандарт України – Державний комітет з технічного регулювання і споживчої політики;

– УкрНДІССІ – Український науково-дослідний інститут стандартизації, сертифікації та інформатики;

– ДНДІ «Система» – Державний науково-дослідний інститут «Система»;

– УкрЦСМ – Український державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації;

– Український навчально-науковий центр із стандартизації, метрології та якості продукції;

– технічні комітети стандартизації;

– територіальні центри стандартизації, метрології та сертифікації.

Перевірка якості виробництва друкованих плат в Україні, виготовлених для промислових галузей, відбувається відповідно державним стандартам – ДСТУ2606-94, ДСТУ2779-94, ДСТУ2783-94, ДСТУ3334-96, ДСТУ3520-97, ДСТУ EN 16182:2022, серія стандартів – ДСТУ EN 16188:2022, ДСТУ EN 60947-4-3:2022, серія стандартів ДСТУ EN 16602:2022 тощо.

Однак, можливість продавати свою продукцію на міжнародних ринках, брати участь у міжнародних тендерах на виробництво друкованих плат, друкованих вузлів та електронної техніки в цілому, дає наявність міжнародного сертифіката відповідної структури.

До міжнародних структур, що розробляють стандарти якості відносяться:

– ISO (Міжнародна організація стандартизації) – розробляє та випускає серії міжнародних стандартів, спрямованих на підвищення якості продукції та послуг, що надаються глобальними підприємствами та організаціями;

– IPC (Інститут зв'язку електронної промисловості) – це офіційна назва асоціації, яка розробляє стандарти, пов'язані з друкованими платами. Стандарти IPC – це стандарти, прийняті в електронній промисловості для проектування, виробництва друкованих плат та електронного складання. Існує стандарт IPC, пов'язаний практично з кожною конструкцією, виробництвом і складанням друкованої плати. Максимально наближений до стандартів МЕК;

– IEC (Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК)) – комісія, що діє під егідою СОТ. розробляє та впроваджує стандарти в галузі електроніки та телекомунікацій;

– ANSI (Американський національний інститут стандартів) – є американським представником у виробництві міжнародних стандартів МЕК;

– IATF (International Automotive Task Force) – спеціалізованою агенцією, заснованою провідними світовими виробниками та асоціаціями автомобілів;

– CEN (Європейський комітет зі стандартизації) – розробляє та впроваджує європейські стандарти на друковані плати;

– UL – стандарт, що застосовується до друкованих плат і блоків живлення. UL вимагає від виробників ретельного тестування своєї продукції, дотримуючись правильних процедур, щоб мінімізувати проблеми з готовим продуктом;

– ITU-T – (International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector) – Сектор стандартизації Міжнародного союзу електров'язку, що діє під егідою ООН. Визначає стандарти в галузі телекомунікації та радіо. Займається розподілом радіочастот, міжнародною телефонною організацією та організацією радіозв'язку, стандартизацією телекомунікаційного обладнання. Згідно цього стандарту відбувається класифікація міжнародних кодів телефонних номерів в світі;

– TIA – (Telecommunication Industry Association) – Асоціація промисловості засобів зв'язку. TIA функціонує під керівництвом Альянсу електронної промисловості EIA (Electronics Industries Alliance) та зосереджує свої зусилля на телекомунікаційної та інформаційної промисловості.

Найбільший акцент при виробництві друкованих план виробники роблять на стандартах ISO та IPC. Світові та вітчизняні виробники, сертифіковані відповідними стандартами, гарантують якість та надійність як всього виробництва – ISO так і конкретного виду продукції – IPC.

Сертифікат ISO 9001:2018 – це документ, що підтверджує, що система менеджменту компанії, сертифікованої даним документом, відповідає певним міжнародним правилам як документально, так і практично. Встановлює правильну модель управління діяльністю організації. Стандарт поширений та визнаний у 190 країнах світу. Сертифікація передбачає перевірку всього виробництва, а не самого продукту. Впровадження цього стандарту дає право на маркування своєї продукції.

Переваги стандарту для міжнародних та українських виробників:

- покращує ефективність роботи;
- підвищує якість продукту, отриманого на виході виробництва;
- діяльність організації відповідає вимогам МООЗ та МОЗ України;

– доступ до європейських ринків.

ISO 14001 – сертифікат міжнародного рівня, який видається з метою зведення до мінімуму шкідливого впливу діяльності виробництва на навколишнє середовище. Іншими словами, він передбачає методики та засоби, які дозволять ефективно використовувати ресурси і скоротити відходи.

Переваги стандарту:

- раціональне використання ресурсів;
- захист біорізноманіття та екосистеми;
- уповільнення зміни клімату;
- запобігання забруднень навколишньому середовищу.

ISO 45001 – встановлює вимоги до розробки та впровадження системи професійної безпеки. Визначає відповідальність керівництва щодо виробничої безпеки, сприяє безпеці робочих місць. Стандарт спрямований на методичне управління в критичних ситуаціях. Переваги стандарту:

- зменшення травматизму та зниження виплат на лікарняні;
- підвищення результативності праці;
- підтвердження безпеки для контролюючих органів.

ISO 13485 – призначений для використання організаціями, які займаються розробкою, виробництвом, установкою та обслуговуванням друкованої плати, щоб створювати найкращі РСВА для індустрії обладнання.

Стандарти IPC розроблені для забезпечення надійності та технологічності виробництва друкованих плат та електронних вузлів. IPC – серія стандартів, визнаний різними органами влади після різних перевірок. Стандарти містять вимоги до розробників та виробників. Як правило, друкована плата, яка відповідає цим стандартам, буде безпечнішою, надійнішою та продуктивнішою. IPC стандарти визначають важливі вимоги до виробу у будь-якій галузевій вертикалі чи сегменті ринку.

IPC налічує більше 300 перевірених галузевих стандартів, які охоплюють всі етапи розробки та виготовлення електроніки. Стандарти IPC включають широкий спектр вимог до виготовлення друкованих плат та їх збірок: матеріал підкладки, міцність паяльного з'єднання, товщина резиста та багато інших виробничих вимог. Запроваджують загальну термінологію.

Серії стандартів IPC для виготовлення друкованих плат:

Конструкція: серія IPC 2200 і IPC-7351:

- IPC-2220 – стандарт містить конкретні специфікації для друкованих плат, таких як гнучкі, жорсткі та інші;

– IPC-7351 – стандарт для конструкції поверхневого кріплення та стандарти шаблонів колодок.

IPC-2152 – визначає вимоги до струмопровідності в мідних трасах та площинах у ряді різних застосувань.

IPC-2221 – загальний стандарт проектування друкованих плат:

– IPC-2221B – стандарт для розробки друкованих схем.

IPC-2222A – стандарт дизайну поперечного перерізу для жорстких друкованих плат.

IPC-2223D – стандарт для жорстко-гнучкої та гнучкої друкованої плати.

IPC-2224 – стандарт РСВ.

IPC-2225 – стандарт дизайну поперечного перерізу для органічних багатокристалльних модулів МСМ-L.

IPC-2226 – стандарт для плат високої щільності HDI.

IPC-2252 – стандарт проектування друкованих плат СВЧ.

IPC-2581 – загальний стандарт для виробництва друкованих плат.

IPC-4101, серії IPC-4200, IPC-412 і IPC-4562 – стандарти матеріалів для виробництва друкованих плат:

– IPC-4101C – стандарт про вимоги до підкладок (ламінати або препреги) друкованих плат.

IPC-4761 – вказівки щодо проектування захисту прохідних каналів.

IPC-6011 – загальна класифікація друкованих плат. Відповідно даного стандарту у виробництві

друковані плати поділяються на три класи рівня якості, від найнижчого (стандарти класу 1) до найвищого (стандарти класу 3) [3]:

– Електроніка класу 1: Загальна електроніка

– Електроніка класу 2: Спеціальна сервісна електроніка

– Електроніка класу 3: Високонадійна електроніка

– A-Level або IPC 6012 клас 3. Спеціалізована електроніка.

Порівняльні характеристики до параметрів на друкованій платі відносно класу якості приведені в таблиці 1.

Робота над друкованою платою необхідно почати з визначення класу до якого буде належати майбутній виріб. Відповідно будуть визначені параметри якості та відповідні стандарти для перевірки.

IPC-6012B – стандарт визначає вимоги до виробництва жорстких друкованих плат, умови для різних категорій продукції щодо структурної цілісності, здатності до спаювання, відстань між проводами.

IPC-6013 – вимоги до продуктивності гнучких друкованих плат.

IPC-7351 – встановлює вимоги до розміру площі та якості поверхні для компонентів SMT. Виробники компонентів використовують даний стандарт при проектуванні контактних площадок для забезпечення надійного електричного з'єднання.

Таблиця 1

	1клас	2клас	3клас	A-Level клас 3
Застосування	Побутові прилади, пульс ДУ, телевізори, іграшки тощо	Комунікаційне обладнання, планшети, смартфони тощо	Електронні виробничі системи, системи підтримки, військові пристрої	Аерокосмічне та медичне обладнання, військові бортові системи, космічне обладнання тощо
Життєвий цикл	Короткий	Довгий	Дуже довгий	Дуже довгий
Мінімальна ширина провідників	0,1мм (4мілс)	0,15мм (6мілс)	0,1мм (4мілс)	0,075мм (3мілс)
Мінімальний відступ між провідниками	0,1мм (4мілс)	0,15мм (6мілс)	0,1мм (4мілс)	0,075мм (3мілс)
Мінімальний діаметр отворів	0,3мм (12мілс)	0,4мм (16мілс)	0,25мм (10мілс)	0,15мм (6мілс)
Мінімальний відступ від отвору до провідників	0,2мм (8мілс)	0,3мм (12мілс)	0,2мм (8мілс)	0,075мм (3мілс)

Електронні компоненти відповідають стандартам:
– Матеріали: J-STD-004, IPC-HDBK-005 і J-STD-006;

– Збірки: IPC-A-610, J-STD-001, IPC-7095, IPC-HDBK-830 IPC/WHMA-A-620 і IPC-7711/771.

IPC-A-600 – стандарт за яким проводиться приймання друкованих плат.

IPC-A-610 – найбільш використовуваний стандарт з серії IPC. Визначає прийнятність електронних компонентів, надаючи стандарти для приймання кінцевого продукту.

IPC-A-620 – стандарт для кабелів, проводів, джгутів.

IPC-A-630 – стандарт використовується для перевірки структури коробки. Крім того, цей спеціальний код допомагає компаніям виробляти, тестувати та перевіряти електронні продукти.

Так J-STD-001 – стандарт контролю виробничого процесу збірки друкованої плати, паяння плат, сполучних матеріалах тощо.

IPC-7711/7721C – стандарт використовується для ремонту, модифікації або переробки виготовленої друкованої плати.

IPC-T-50 – стандарт для схем, друкованих плат та пакети для всієї галузі.

IPC-TM-650 – інструкція з тестування стандартів IPC для друкованих плат. Може оцінити всі аспекти друкованих плат стандартним способом. Наприклад:

– IPC-TM-650 2.6.14.1 – перевірка методу електронної тенденції міграції на поверхні плати;

– IPC-TM-650-2.3.25.1 – тестування вимірювання іонної чистоти тощо.

IPC-D-325 – стандарт містить інструкції та вимоги до документації для друкованих плат, компонентів і опорних креслень.

Розробники стандартів IPC «тримають руку на пульсі» розвитку сучасних технологій, тому в них містяться найсвіжіші рекомендації з роз-

робки [4]. Наприклад, стандарти передбачають вимоги до плат вище 5-го класу точності, в ДСТУ максимальний клас точності – 5. Розроблено базу PCB-Libraris IPC з більшістю сучасних радіоелементів і можливістю їх експорту в різні програми для розробки ПП: PCAD або CAD і тощо.

Висновки. Виробники друкованих плат є основою електронної промисловості, перетворюючи розробки конструкцій на фізичні, високоякісні продукти.

Завдяки прогресу в процесах виготовлення друкованих плат, матеріалах та тестуванні, найкращі виробники постачають плати, які відповідають високим стандартам розроблених міжнародних норм.

Виробництво друкованих плат відповідно міжнародних стандартів допомагає контролювати якість кінцевого продукту.

Стандартизація всіх етапів процесу розробки та виготовлення друкованих плат гарантує їх надійність. Однією з головних переваг дотримання міжнародних стандартів для компаній-виробників – впевненість, що результат задовольнить кінцевого споживача.

Гарантія того, що друковані плати відповідають міжнародним стандартам, дозволяє виробляти електронні вироби, які в повній мірі відповідають жорстким вимогам контролю якості, зменшуючи кількість браку, знижуючи обсяги ремонту тощо. Особливо це важливо при виготовленні друкованих плат для космічної галузі, військової, автомобільної галузі, медичного обладнання.

Регулярна модифікація та удосконалення стандартів забезпечує розвиток як самих компаній так і виробництва та процесів його супроводу, відповідно до сучасних вимог розробки, виготовлення та технологій.

Виробники друкованих плат з міжнародною сертифікацією завжди мають достатні об'єми замовлень та постійних замовників.

Список літератури:

1. Євсіна Н.О., Дудник А.В. Конструювання і технологія виробництва систем телекомунікацій: Конспект лекцій для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання – Харків: НТУ «ХПІ», 2022. URL:<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/22b81594-f793-4b2d-bae0-71da5f0fc1b/content>. (дата звернення: 08.11.2024).

2. Закон України про стандартизацію. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1315-18#Text>

3. Зінгер Я.Л., Адаменко Ю. Ф. НАСКРІЗНА РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ. ЧАСТИНА 2 КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ. – Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2023 р. URL:<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f86043c1-c105-4f59-ba6b-25fbf12015b5/conten> (дата звернення: 08.11.2024).

4. Яцюк Л. А., Косогін О.В., Ущуповський Д. Ю., Лінючева О. В., Фатєєв Ю. Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018р. URL:<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e4f801f7-f2f0-4191-bfc3-17b40bd3e19e/content> (дата звернення: 08.11.2024).

5. Union Electronic Technology. Електронний ресурс. URL: <https://uetpcb.com/uk/why-us/> (дата звернення: 08.11.2024).
6. LEONORM. Електронний ресурс. URL: <http://www.leonorm.lviv.ua/Default.php?Page=stlist&ObjId=562&CatId=1&code=&TableNum=> (дата звернення: 08.11.2024).
7. Органи стандартизації. Електронний ресурс. URL: <https://ua.nettech.ua/news/organi-standartizatsii> (дата звернення: 08.11.2024).
8. Спрощення електронних інновацій. Електронний ресурс. URL: <https://hilelectronic.com/uk/certifications/> (дата звернення: 08.11.2024).
9. ISO-Certify.com. Електронний ресурс. URL: <https://iso-certify.com/ua/iso-9001/> (дата звернення: 08.11.2024).

Shornikova S.V. QUALITY OF PRINTED CIRCUIT BOARD PRODUCTION. ANALYSIS OF INTERNATIONAL STANDARDS

This article examines the use of electronics in all areas of human life. Electronic equipment at a large enterprise or a primitive household device must perform the tasks set out by the developer in a high-quality manner. The responsibility for the perfect operation of any device lies with the manufacturers, who must fulfill the order in a quality manner, in accordance with the documentation and in compliance with all national and international norms and standards.

The article describes the manufacturing process of any electronic equipment, which begins with the development and manufacture of a printed circuit board, the type and complexity of which depends on the application. Each stage in the production of a printed circuit board requires control to ensure reliability, manufacturability, and safety. The choice of PCB base material, the method of applying the conductive pattern, the protective coating of the board – all these stages of production must be performed on high-precision equipment to ensure maximum accuracy.

It was found that fulfillment of these requirements is possible if the requirements are met in accordance with the state standards – DST of Ukraine and international standards – ISO, IPC, IEC, etc.

These requirements can only be met if the requirements are met in accordance with national standards, such as the State Standards of Ukraine, and international standards, such as ISO, IPC, IEC, etc.

The standards on which PCB production is based include a wide range of requirements, reduce costs from non-standard processes, ensure quality and reliability, and make interaction between the customer and the manufacturer more efficient. Producing a high-quality product, where a printed circuit board is one of the main components, means manufacturing in compliance with norms and standards. Compliance with the requirements of the relevant regulatory documents provides a guarantee of quality.

Manufacturing products in accordance with international standards makes the company more competitive in the market of manufacturers. The quality of the production stages of printed circuit boards, printed components, product assembly, etc. is determined by the standards developed by national and international standardization bodies.

Key words: *electronic equipment, printed circuit board, conductive pattern, protective coating, state standard, international standards ISO, IPC, IEC.*

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

UDC 629.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/09>

Sydorchuk A. Yu.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Kravchenko I.M.

SE "KYIVOBLSTANDARTMETROLOHIIA"

SPECIFIC ASPECTS OF CAMERA VIEWING ANGLE STABILIZATION DURING FPV DRONE CONTROL

The article examines the development of an automated camera fixation system for FPV drones, addressing one of the primary challenges of dynamic flights – instability of the viewing angle. Video instability caused by drone tilts significantly reduces task performance, especially in military and reconnaissance operations.

The prototype development process consisted of several stages: selecting the component base, soldering the parts according to the manufacturer's schematic, and conducting multi-stage functionality testing. The initial stage involved verifying the operability of the flight controller through software. Subsequently, the primary system components, including the camera, video transmitter, signal receiver, GPS module, and motor controller, were soldered. The final stage was the integration of servomotors for camera stabilization and comprehensive system testing under laboratory conditions.

Experimental studies revealed that the developed system ensures a stable video stream even during sharp maneuvers, significantly improving operator convenience. This is achieved through the system's rapid response to changes in the drone's position and precise adjustments of stabilization parameters. The results confirm that the automated camera fixation system enhances task performance by minimizing the impact of dynamic movements on video quality.

Future advancements in the system involve the integration of artificial intelligence algorithms for real-time object recognition and tracking. This will significantly expand the capabilities of FPV drones, enabling their use for complex tasks in military, reconnaissance, and civilian applications. Integrating features such as adaptive viewing angle adjustments and reduced energy consumption will allow longer flight durations and increased operational autonomy. Thus, the developed camera stabilization system holds significant potential for improving the functionality of modern FPV drones, making them more efficient and competitive.

Key words: FPV drone, automated fixation, camera stabilization, prototyping, UAV.

Formulation of the problem. Over the past few years, the development of uncrewed aerial vehicles (UAVs) has experienced significant growth. This trend is driven by the rapidly increasing demand for drones across civilian, military, and commercial sectors. Drone manufacturing is expanding daily, with the number of companies involved in their development continuing to rise. FPV (First Person View) drones exhibit the most dynamic growth among UAVs due to their real-time operational capabilities for performing complex tasks. Their popularity stems from the ability to transmit video directly from the drone, enabling rapid responses to situational changes.

According to data from Tochnyi.info [1], FPV drones are extensively utilized in the Russo-Ukrainian war for reconnaissance and combat missions.

Statistics indicate that a substantial proportion of targeted objectives have been explicitly achieved through FPV drones (Fig. 1).

To ensure that a product remains competitive and meets modern demands, it is essential to implement new technological solutions continuously. One of the critical challenges is stabilizing the FPV drone's camera during dynamic maneuvers. Due to the high speeds and abrupt trajectory changes, operators often lose portions of their field of view because of camera tilt. This creates "blind spots" and reduces task performance efficiency. In military applications, such loss of information can have severe consequences.

Addressing this issue requires developing an automated camera stabilization system that ensures a fixed viewing angle regardless of the drone's spatial

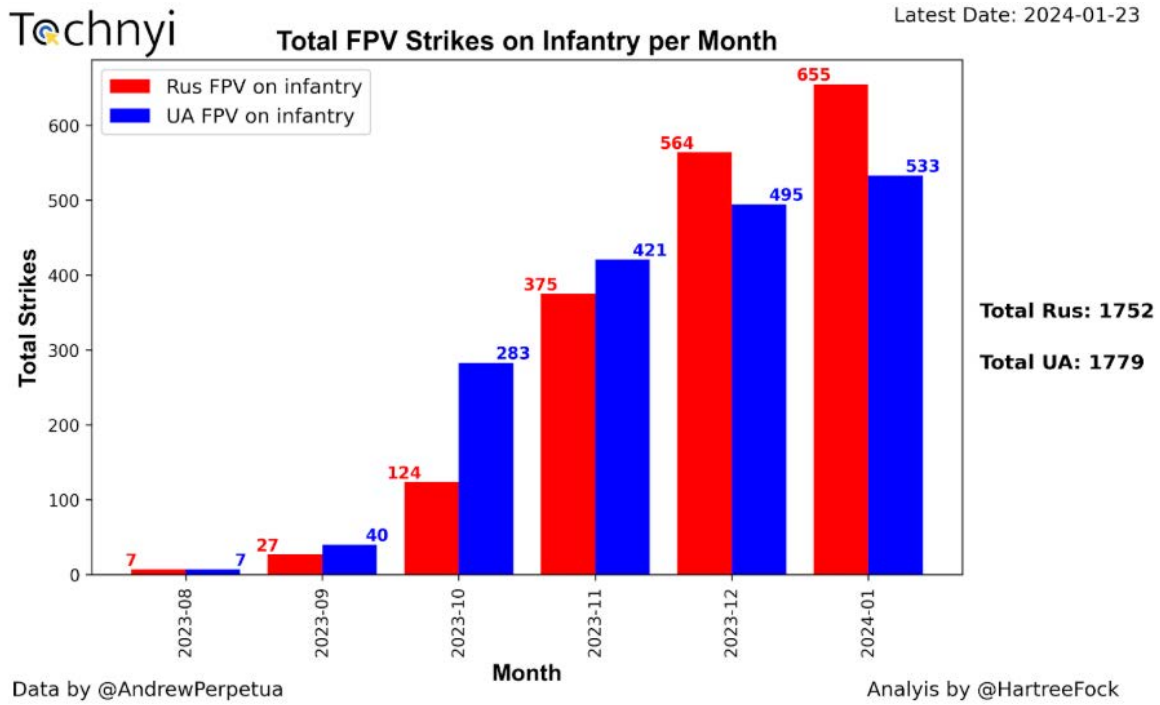


Fig. 1. Graph of the frequency dynamics of FPV drone usage in the Russian-Ukrainian war [1]

orientation. This article addresses this problem by integrating advanced solutions into developing computerized systems for FPV drones.

Analysis of recent research and publications.

One of the most promising approaches in FPV drone camera stabilization is the integration of gyroscopic sensors with flight controller software. This enables adaptive systems that adjust the camera's position based on the drone's movements, ensuring stable imagery even under challenging flight conditions.

Currently, a variety of camera stabilization technologies are available. For instance, gimbal mounts (Fig. 2) are widely used in professional videography. However, their drawbacks, such as significant weight, high cost, and energy consumption, limit their application in compact FPV drones. In contrast, lighter solutions based on gyroscopic stabilizers exhibit substantial potential. Studies have explored the use of three-axis gyroscopes combined with stabilization algorithms. This approach effectively compensates for drone tilts during flight and ensures precise camera viewing angle control.

Given the rapid advancement of FPV drones and the increasing demands on their functional capabilities, the proposed approach holds significant relevance. It can be applied in civilian and military domains, particularly in monitoring, reconnaissance, and security operations. The further development of this technology could involve integrating artificial intelligence elements for real-time object tracking.

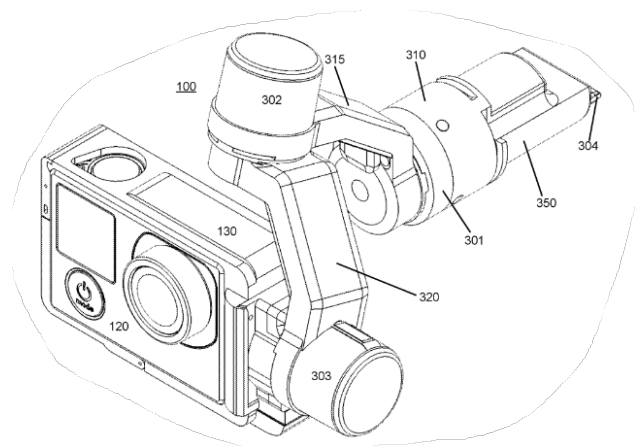


Fig. 2. Example of gimbal mount and camera attachment [2]

Moreover, recent research highlights considerable interest in incorporating machine learning algorithms for camera stabilization. This opens up automated real-time object tracking opportunities, especially critical for military and reconnaissance missions.

Task statement. The work aims to develop an automated camera fixation system for FPV drones that will ensure:

- Stability of the viewing angle regardless of the drone's orientation;
- Enhanced operator comfort when controlling the UAV;
- Improved accuracy in performing reconnaissance and combat missions.

To achieve this objective, the following tasks were set:

- Conduct a review of current solutions in the field of FPV drone camera stabilization;
- Design a functional schematic of the stabilization system;
- Select an optimal component base for the prototype;
- Implement the prototype and conduct experimental testing.

Outline of the primary material of the study. The initial stage in developing the camera stabilization system involved selecting the component base. Identifying optimal components ensured high performance and energy efficiency. The following components were chosen for the system implementation:

1. Flight Controller JHEMCU GF30F405: Processes sensor data and generates signals to control actuators.
2. FPV Camera Runcam Phoenix 2: Delivers high-quality video streams to the operator.
3. Servomotors MG90S: Used to adjust the camera's position precisely according to controller commands.
4. Video Transmitter TBS Unify Pro: Handles the transmission of video signals from the camera to the receiver.

5. Radio Signal Receiver FrSky XM+: Provides communication between the controller and the drone.
6. GPS Module BN-220: Collects location, speed, and flight direction data.
7. Buzzer HGLRC Soter: Assists in locating the drone in case of a signal loss or crash.
8. Motor Speed Controllers Mamba F40 4-in-1 ESC: Manage the motor speeds, directly affecting the drone's maneuverability.
9. Battery Samsung 21700 Li-Ion 5000mAh: Powers all drone systems, ensuring a stable energy supply.

The next stage in prototype development involved designing the functional schematic of the system (Figure 3).

The functional schematic of the automated camera fixation system for the FPV drone was designed with an emphasis on the optimal integration of all components. The schematic development's primary objective was to ensure all elements' stability and minimize potential errors during assembly and operation. The functional schematic includes the following key components:

- The flight controller is the central unit for processing signals from gyroscopic sensors and the radio signal receiver.
- The camera transmits the video signal to the video transmitter, which sends it to the operator in real-time.

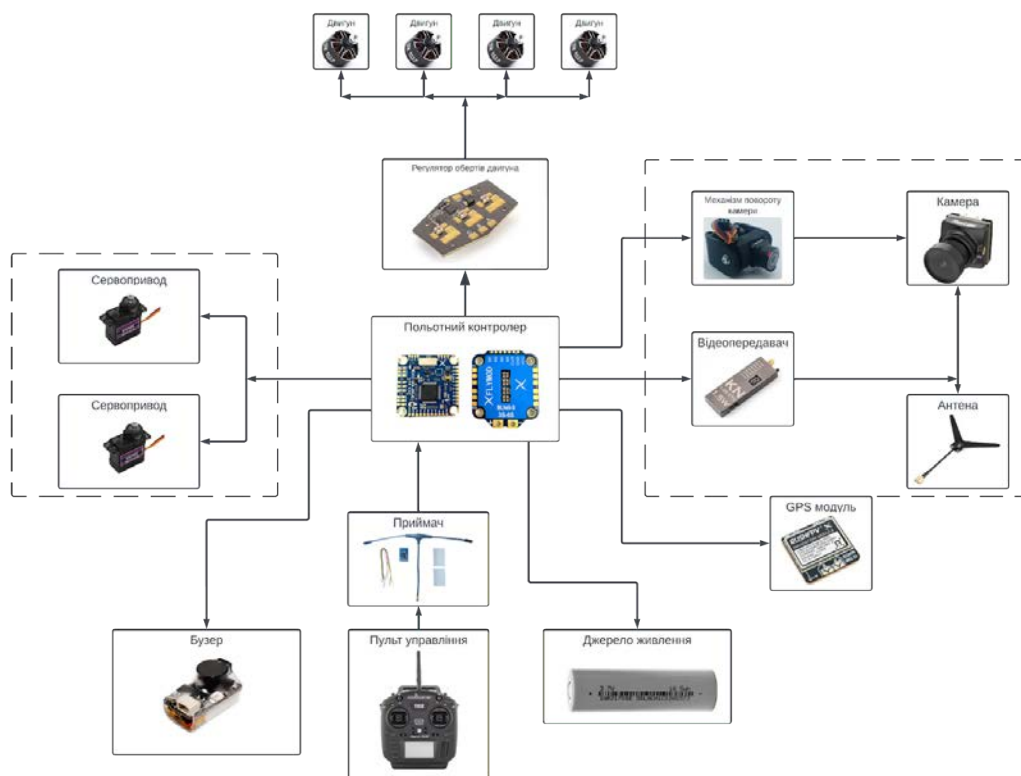


Fig. 3. Functional schematic of an FPV drone

- Servomotors receive signals from the controller and adjust the camera's position accordingly.
- The GPS module and receiver provide additional location monitoring and command transmission functionality.
- The battery maintains the Power supply, ensuring all components' stable operation.

Based on the functional schematic, the sequence for connecting components and integrating them into a unified system was determined. This approach minimizes the risk of incorrect assembly and ensures system stability, even under challenging operational conditions.

Following the development of the functional schematic, the next stage was the assembly and soldering of the FPV drone system components. During the soldering process, it is crucial to strictly adhere to the algorithm and the provided soldering schematic (Figure 4).

Figure 4 illustrates the soldering schematic for the components of the FPV drone system to the flight controller. The schematic clarifies the placement of contacts for each of the possible elements.

The soldering algorithm involves selecting the correct sequence of actions during component soldering. Before starting the process, it is essential to verify the functionality of the flight controller and ensure the absence of any damage or manufacturing defects. Testing is typically performed by simply

connecting the flight controller to a computer via a Type-C cable. The Betaflight software [4] is used to confirm the operational status of the flight controller. Before connecting the flight controller to the computer, the Betaflight software must be launched. The program should immediately display a virtual drone model that reacts to the tilting of the flight controller. This response is based on data from the gyroscope integrated into the flight controller. If the controller's tilt corresponds synchronously with the virtual drone's movement on the screen and aligns with the tilt vector, it confirms the flight controller's functionality.

After the initial testing, the next step is gradually soldering components according to the schematic. The first step involves soldering the camera, a fundamental module in any FPV drone system. The drone's operation relies on transmitting images from the camera to the operator's FPV goggles. Once the corresponding contacts are connected, the process continues with the video transmitter, which is responsible for sending the video feed to the operator. The next component to solder is the GPS module. While not mandatory in the system, its functionality significantly simplifies data collection during flight, enabling tracking speed, direction, and distance traveled.

Following this, the receiver is soldered, essential for any FPV drone system. It is critical for transmitting

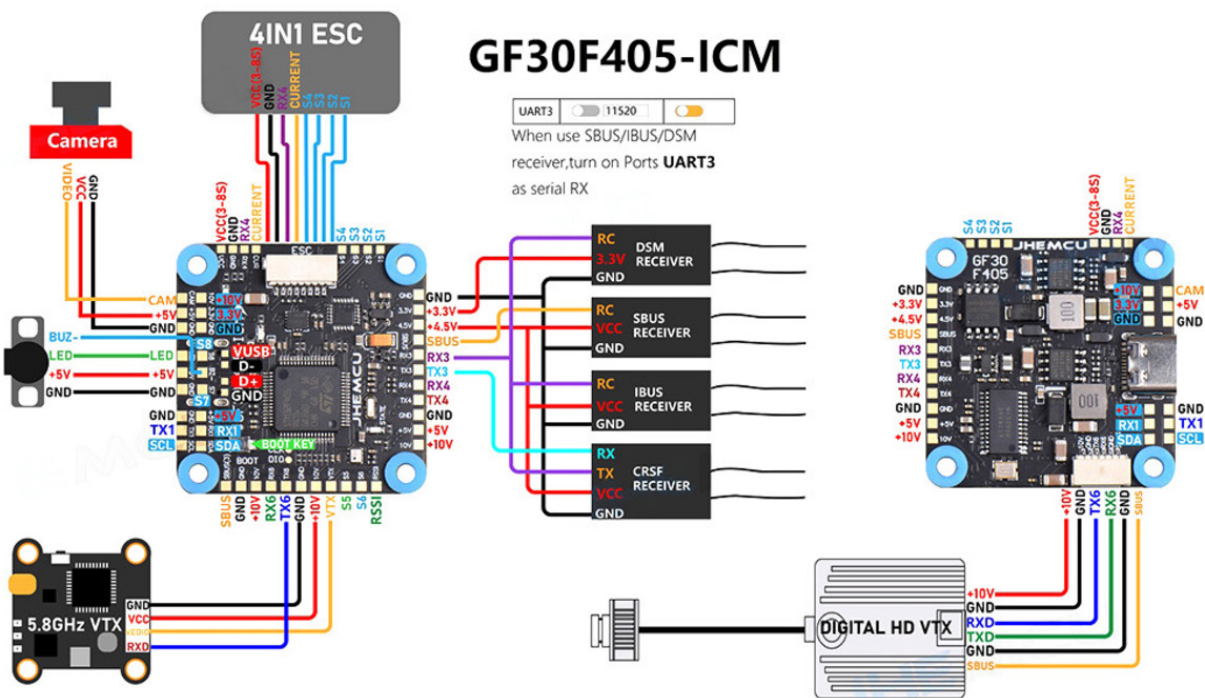


Fig. 4. Connection schematic of the JHEMCU GF30F405 ICM F405 flight controller [3]

control signals from the remote controller to the UAV. Its functions include maintaining a stable connection at a specified frequency and avoiding interference such as electronic countermeasures (ECM). The next step involves soldering the buzzer or locator beacon. The buzzer is essential for locating the drone in case of a crash or signal loss. The final element to solder is the motor speed controller, a key module that manages the rotation speed of the drone's motors. This component ensures proper motor rotation direction, directly affecting the drone's maneuverability and speed. The system also includes servomotors used for camera stabilization and payload release systems. Most listed components are mandatory, but additional modules can be integrated depending on the operator's needs and tasks. The soldering algorithm involves sequential testing of the flight controller's functionality, connecting system components according to the manufacturer's schematic, and integrating them into a unified functional system. The process begins by verifying the flight controller's functionality with software tools, followed by step-by-step soldering of modules, such as the camera, video transmitter, GPS module, signal receiver, buzzer, and motor speed controllers. A critical step is the proper configuration of the system to ensure stable component operation and effective task execution.

The system operates on continuous data analysis from gyroscopic sensors and automatically adjusts the camera's position. The main stages of operation are as follows:

1. Collecting data on angular velocities and the drone's tilt.
2. Processing the data by the flight controller and determining the necessary adjustments.
3. Transmitting signals to the servomotors to adjust the camera's position.

4. Continuously updating data to ensure smooth operation.

A series of experiments were conducted under both laboratory and field conditions to evaluate the system's effectiveness. The primary evaluation criteria were:

- Stabilization accuracy during abrupt maneuvers.
- Energy efficiency of the system.
- Video stream quality during dynamic flights.

The results demonstrated that the system maintains a stable viewing angle regardless of the drone's movement, significantly enhancing operator comfort and task performance efficiency.

Conclusions. The developed automated camera fixation system for FPV drones has proven its effectiveness in stabilizing the viewing angle during flights under challenging conditions. Experimental studies confirmed that the proposed solution significantly reduces the impact of dynamic maneuvers on image quality, ensuring a stable video stream for the operator. This greatly enhances the ease of drone control and improves the accuracy of task execution.

The system has broad application prospects, particularly in military and reconnaissance missions, where operational efficiency and precise data transmission are critical. Further development could include:

- Integration of artificial intelligence for real-time object tracking.
- Optimization of energy consumption to increase flight duration.
- Development of additional features, such as adaptive viewing angle adjustments based on selected flight scenarios.

Thus, the proposed automation system represents a promising platform for modernizing FPV drones and enhancing their competitiveness in contemporary environments.

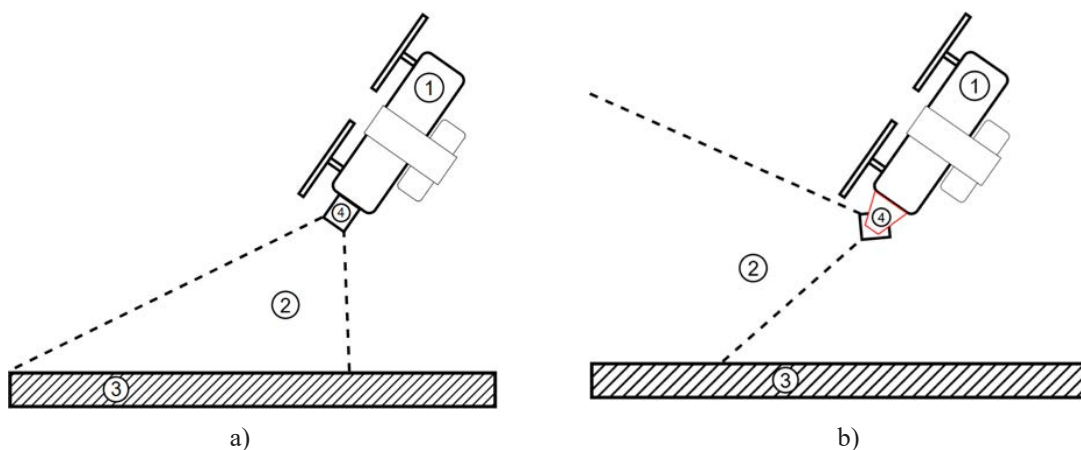


Fig. 5. Principle of maintaining the tilt angle of an FPV drone and the viewing angle:
 1 – drone, 2 – viewing angle, 3 – ground, 4 – camera; a – without a camera stabilization system;
 b – with a camera stabilization system

Bibliography:

1. Tochnyi Info [Electronic resource] – Access mode: <https://tochnyi.info/2024/01/update-on-fpv-drone-warfare-27-01-2024-2/>
2. Camera System Using Stabilizing Gimbal [Electronic resource] – Access mode: [https://patents.google.com/patent/US11480291B2/en?q=\(camera+rotation+system\)&oq=camera+rotation+system](https://patents.google.com/patent/US11480291B2/en?q=(camera+rotation+system)&oq=camera+rotation+system)
3. Flymod [Electronic resource] – Access mode: https://flymod.net/item/fc_jhemcu_gf30f405_icm
4. BetaFlight [Electronic resource] – Access mode: <https://betaflight.com>

Сидорчук А.Ю., Кравченко І.М. ОСОБЛИВОСТІ ФІКСАЦІЇ КУТА ОГЛЯДУ КАМЕРИ ПРИ КЕРУВАННІ FPV ДРОНОМ

У статті розглянуто розробку системи автоматизованої фіксації камери для FPV-дронів, що дозволяє вирішити одну з основних проблем динамічних польотів – нестабільність кута огляду. Нестабільність відеозображення, викликана нахилами дрона, суттєво знижує ефективність виконання завдань, особливо у військових та розвідувальних операціях.

Створення прототипу включало кілька етапів: вибір елементної бази, пайка компонентів відповідно до схеми виробника та багатоступеневе тестування працездатності системи. Першим етапом була перевірка працездатності польотного контролера за допомогою програмного забезпечення. Далі проводилася пайка основних компонентів системи, включаючи камеру, відеопередавач, приймач сигналу, GPS-модуль та регулятор обертів. Завершальним етапом стала інтеграція сервоприводів, які забезпечують стабілізацію камери, і фінальне тестування всієї системи у лабораторних умовах.

Експериментальні дослідження показали, що розроблена система забезпечує стабільний відеопотік навіть під час виконання різких маневрів, що значно підвищує зручність для оператора. Це досягається завдяки швидкій реакції системи на зміни положення дрона та точному налаштуванню параметрів стабілізації. Результати підтверджують, що автоматизована фіксація камери дозволяє ефективніше виконувати завдання, мінімізуючи вплив динамічних рухів на якість зображення.

Подальший розвиток системи передбачає інтеграцію алгоритмів штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання та відстеження об'єктів у реальному часі. Це значно розширить можливості FPV-дронів, дозволяючи їм використовуватися для складних завдань у військовій, розвідувальній та цивільній сферах. Інтеграція таких функцій, як адаптивна зміна кута огляду та зниження енергоспоживання, дозволить забезпечити триваліший час польоту та більшу автономність роботи. Таким чином, розроблена система стабілізації камери має великий потенціал для вдосконалення функціональності сучасних FPV-дронів, роблячи їх ефективнішими та більш конкурентоспроможними.

Ключові слова: FPV-дрон, автоматизована фіксація, стабілізація камери, прототипування, БПЛА.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

UDC 621.31:537.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/10>

Antypchuk B.O.

Zhytomyr Agrotechnical Professional College

Novosyletsky U.L.

Zhytomyr Agrotechnical Professional College

Lavrishchev O.O.

Zhytomyr Agrotechnical Professional College

ELECTROMAGNETIC INDUCTION AS A BASIS FOR UNCONVENTIONAL METHODS OF ELECTRICITY GENERATION

This article is devoted to a very relevant issue today, which will allow solving the energy needs of humanity, namely, alternative energy. However, it is not just traditional objects of non-traditional electric power that are considered, namely the possibilities of applying the basic law of electrical engineering - the principle of electromagnetic induction. The article reveals a whole aspect of the possibilities of generating electrical energy from renewable energy sources due to electromagnetic induction, such as floating generators of electrical energy, energy of tides and waves, kinetic energy of moving objects and magnetic generators.

The phenomenon of electromagnetic induction itself is also described, it is revealed, thanks to which properties electromagnetic induction has acquired great importance for science, because this phenomenon has gained practical application in many fields of industry and science, for example: radio engineering, medicine, energy, various household appliances, wireless transmission of electricity, modern communication technologies, etc. The special significance of the application of the principle of electromagnetic induction in the alternative energy of permanent magnets is revealed.

An overview of engineering developments already existing in the world, whose activity is based on the principle of electromagnetic induction, and which have already proven their practicality and energy efficiency, is made. It has been found that capital energy projects allow significant savings on financial costs of electricity generation, which makes it possible to obtain electricity from renewable energy sources.

The principle of operation of each unit already existing in the world is described separately, the principle of operation of which is based on electromagnetic induction. The method of applying this phenomenon in the work and structure of each of them for the production of electricity from inexhaustible, renewable energy sources is disclosed. Users of scientific information are also introduced to the structure and principle of operation of a magnetic generator, which belongs to developments in the field of electrical engineering and works on permanent magnets. The article emphasizes that such a permanent magnet generator can be used for room lighting, which is especially relevant in our current conditions, and it can also be used in light industry to power production process equipment.

As a result of the conducted research, the article focuses on the fact that the population's needs for energy resources will only grow, therefore such an important discovery as the principle of electromagnetic induction will allow engineers and scientists to implement even more progressive methods of generating electrical energy due to this phenomenon.

Key words: *electromagnetic induction, magnetic generator, kinetic energy, alternative energy, wave and tidal energy, floating generator, permanent magnets.*

Formulation of the problem. The issue of energy «abundance» has always been an acute one for humanity. Rising electricity prices and the exhaustion of natural resources are forcing us to make more active use of inexhaustible energy sources, but the

existing alternative energy methods cannot fully satisfy the growing needs of humanity for electricity, as our electricity needs far exceed the volume of electricity production, so we are constantly looking for new renewable energy sources.

It is appropriate to say that most alternative energy sources, such as solar, wind, tidal and geothermal energy, exist independently of human activity, but not all of these renewable energy sources are competitive for a number of reasons: some of them occupy a large area; require significant funds for installation and operation; affect the ecological state of the environment; and depend on geographical location and climatic conditions. Therefore, the search for new, more efficient engineering solutions to the energy problem never stops.

In contrast to all existing methods of generating electricity, electromagnetic induction is breaking records in alternative energy, which is the basis of the principle of operation of existing power generation plants and new ones, which are ingenious engineering ideas that allow you to get electricity from elementary things (kinetic energy of motion and a magnetic generator).

Analysis of latest research and publications.

The principle of electromagnetic induction is of utmost importance in electrical engineering and power generation, as evidenced by a number of scientific publications. For example, in his article [8], Hermann Hartel presents an alternative approach to electromagnetic induction based on the fundamental law of electrodynamics by Wilhelm Weber. It covers mutual induction, self-induction, parallel and antiparallel currents, as well as currents in one and the opposite direction. The author points out that both approaches lead to the same quantitative results, but the conceptual difficulties are quite different.

Electromagnetic induction is widely used in technical developments in various fields of knowledge, for example, there is a description of a study in medical diagnostics to increase the output power for a given ambient oscillating magnetic field, which is based on the principle of electromagnetic induction [10].

The following article contains information about the research that focuses on the construction of the generator and the evaluation of the device to determine its possible applications and future improvements, described in [5]. The generated energy can be used in numerous applications, such as powering and charging mobile devices, powering small LEDs and light bulbs.

Another publication is devoted to a study on the fundamental principle of electromagnetic induction and its application in generators and transformers [9]. This article highlights that a series of carefully planned experiments systematically investigates the relationship between changes in magnetic

fields and induced electromotive force (EMF), and that the data collected are consistent with theoretical expectations, confirm Faraday's laws by demonstrating a direct relationship between varying magnetic fields and induced EMF, and the graphical representation further illustrates a linear relationship between the rate of change of magnetic flux and induced EMF, in accordance with Faraday's second law. The implications of these findings extend to the functioning of generators and transformers, emphasizing the role of electromagnetic induction in converting mechanical energy into electrical energy and facilitating energy transmission [9].

The application of the properties of permanent magnets proves the real possibility of application of the role of an alternative energy source. This is discussed in publications on the operation of electric generators based on permanent magnets [11]. The author of this publication scientifically substantiates that the introduction of technical solutions based on permanent magnets will significantly reduce the expenditures on electric power.

The conversion of kinetic energy of movement into mechanical energy to generate electricity is described in a number of publications: paving energy generating tiles [2], the next publication [6] is devoted to the development of a road rib that can be designed in such a way that any vehicle, from a bicycle to a truck, passing over it will generate electricity, which will then be stored on the roadside in a battery and then used to power any electrical roadside device.

How the principle of electromagnetic induction is applied in the operation of tidal power plants is described in a number of papers: [1], [3], [4].

Aim of the article. The purpose of this article is to prove the prospects of electromagnetic induction in generating electricity, since such electricity is cheap, and only coils and magnets are required for the operation of any installation for generating electricity using electromagnetic induction, and the successful experimental confirmation of Faraday's laws only enriches our understanding of the basic principles of electromagnetism and their application in the real world.

The main part of the research. A conductor with an electric current is attracted to a magnet - this is according to Ampere's physical law for a conductor with an electric current in a magnetic field. Ampère called this effect electrodynamic interaction. Based on the results of Ampère's experiments, it was found that the modulus of Ampère's force F is proportional to the length of the conductor L and depends on its position in the magnetic field. To quantitatively

describe the effect of a magnetic field on a conductor with a current, a quantity called magnetic induction was introduced (Figure 1):

$$B = F_A / I \cdot L, \quad (1)$$

where B – magnetic induction, (T); F_A – Ampère's force, (N); I – current, (A); L – length of the conductor, (m).

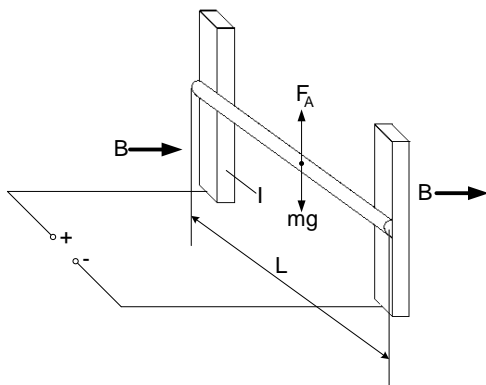


Fig. 1. Effects of the ampere force on a conductor with a current

Electromagnetic induction (Figure 2), which was discovered by Michael Faraday in 1831, is a phenomenon where any change in the magnetic flux that penetrates a closed current-carrying circuit results in an induction current in this circuit, the parameters of which depend on the rate of change in the magnetic flux.

Faraday discovered that the electromotive force that occurs in a closed conductive circuit is proportional to the rate of change of the magnetic flux through the surface bounded by this circuit.

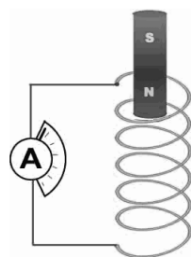


Fig. 2. The phenomenon of electromagnetic induction

It is well known that electric currents generate a magnetic field around them. The connection between the magnetic field and the current has given rise to numerous attempts to excite the current in a circuit using a magnetic field. This proves that in a closed conductive circuit, when the magnetic induction flux covered by this circuit changes, an electric current, which is called induction current, appears.

Based on the fundamental laws that characterize the properties of magnets, new technical solutions

are gaining momentum: renewable energy sources are emerging, with human knowledge and creativity contributing to their creation. It is these developments in unconventional energy based on the principle of electromagnetic induction that will be discussed below, but it should be noted that some of them are still in the research and development phase, and their technical and economic prospects are only being explored.

Electromagnetic induction is an important phenomenon in power engineering and has various applications. This phenomenon is also used in non-traditional electric power or in energy technologies that may look non-standard. One of the unconventional applications is the use of electromagnetic induction to obtain energy from various sources.

Take floating power generators as an example. Some concepts use floating structures moving in water to create vibrations that can then be used to create electrical energy through electromagnetic induction.

Another prominent example of the application of electromagnetic induction in non-conventional electricity is tidal and wave energy: some systems use the motion of tides and waves to generate oscillations that can be used to create electrical energy through electromagnetic induction.

Also kinetic energy of moving objects: the energy created by the movement of objects such as cars or bicycles, or the kinetic energy of human steps can be used to generate electrical energy through electromagnetic induction.

And finally, magnetic generators: invented and developed generators that use permanent magnets and electromagnets to create electrical energy.

Let's consider in more detail each of these types of application of electromagnetic induction for the generation of electrical energy.

Floating power generators are innovative systems that use the movement of water to generate electricity. The basic idea is that the movement of a flow, such as water, produces oscillations or mechanical motion that can be used to drive a generator of electricity.

The main components and principles of operation of floating power generators look something like this: first, it is a floating structure that can move relative to the water flow; secondly, a mechanism (it can be a wheel, turbine or other mechanical device) is placed on this floating structure, which reacts to the movement of the water flow. The mechanical movement generated by the movement of the flow is transmitted to the generator of electricity. A generator uses this mechanical motion to create rotational motion, which results in the generation of electrical energy. In some cases, a floating power generator may have a permanent energy storage element, such as a

battery or capacitor, to ensure a stable power supply when the flow becomes less intense.



Fig. 3. CorPower floating generator [8]

Floating generators are a breakthrough in unconventional electricity. They can be applied on different scales: from small mobile systems to large engineering solutions. This is only one approach to using the movement of water to generate electricity, and its implementation may vary depending on the specific project and operating conditions. For example, Sea Wave Energy Ltd (SWEL) has been working on a device that can generate energy using sea waves for more than a decade. The generator, named the Waveline Magnet, should provide decent production of clean energy at "ultra-low cost". For example, the Swedish company CorPower reported impressive results from tests of its full-scale floating generators in the Atlantic Ocean. These generators skillfully time their movements to amplify small waves while protecting themselves from dangerous storm conditions (Figure 3).

Waveline Magnet generators are long modular chains of plastic floats. Floats are located across the waves. Thus, the wave, passing under the chain, causes the modules to rise and fall.

The floats are not connected to each other, but are attached to the central longitudinal bar with the help of levers. Thanks to this, the whole structure resembles a spine with movable ribs. It is in this central part that generators are located, which convert the energy of movement into electricity (Fig. 4).



Fig. 4. Waveline Magnet floating generator [13]

The principle of electromagnetic induction using the energy of tides and waves can be implemented by a special system that uses the movement of water to create electrical energy. The basic idea is that the movement of water generates mechanical motion, which in turn is used to generate electrical energy through the principle of electromagnetic induction (Figure 5).

The main stages of this process are as follows:

The first is that the system must be located in an area with water's stream, this could be a coastal area with high tides or a place of intense waves. Further, the movement of the water leads to the mechanical movement of some parts of the installation, such as floats, fins or other mechanical elements. This movement can be caused by tides, tides, waves, or a combination of these factors. The mechanical motion is then transmitted to the electricity generator. In this context, the generator can use electromagnetic induction – a change in the magnetic field during mechanical movement generates an electric current.



Fig. 5. The world's first tidal power plant, La Rance, France [5]

The generated electricity can be used to supply power to nearby consumers or transmitted through the power grid.

This method uses the relatively constant and predictable movement of water to create energy. Its effectiveness can depend on a number of factors, such as tidal intensity, wave patterns and installation design.

The principle of using the kinetic energy of moving objects to generate electrical energy through electromagnetic induction uses mechanisms based on a moving magnet and the joint use of Faraday's laws of electromagnetic induction.

The main stages of this process are as follows: an object with kinetic energy moves relative to another object or system, it can be a car, a bicycle, a train, the kinetic energy of human steps or any other moving object; a magnetic field is created in the area of the object's movement, this field can be created by a permanent magnet or other means; an inductor (coil)

is located near the moving object, which is connected to an electric generator; a change in the magnetic field that penetrates the coil generates an electric current in it, according to the laws of electromagnetic induction; the received electric current from the coil is fed to an electric power generator, the generator converts the mechanical energy received from the movement of the object into electric energy.

A striking example of the kinetic energy of moving objects is the energy-generating Pavegen paving slabs developed by engineer Lawrence Campbell-Cook.

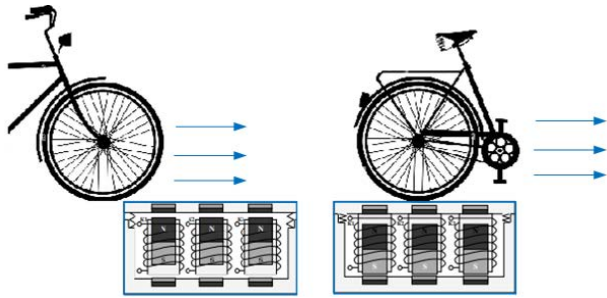


Fig. 6. The principle of operation of electric tiles

The tiles are made of a flexible, waterproof material derived from the recycling of used car tires, which makes them durable and resistant to abrasion. The tile body is made of special stainless steel. When pressed, the surface deflects by 5-10 mm, which activates an integrated converter to generate electricity. The converter technology is based on hybrid conversion, which includes the piezoelectric effect to generate electricity through deformation and electromagnetic induction. The only disadvantage is that it is inefficient to install it in places with low traffic. The principle of operation of low-power energy generating tiles is shown in Figure 6 [2].

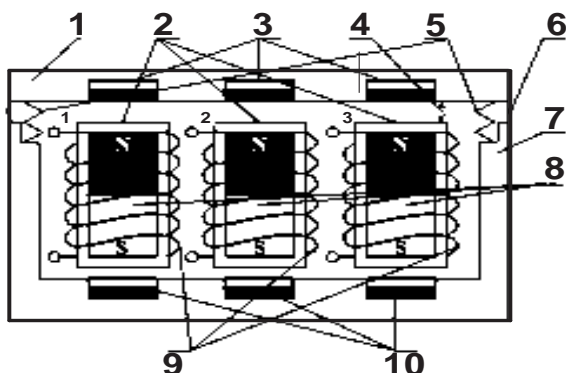


Fig. 7. Design of an electric generating tile [2, p. 69]

Figure 7 shows the design of the energy-generating tile: 1 – pressure cover; 2 – stator; 3 – neodymium magnets in the pressure cap; 4 – working stroke of the

pressure cover; 5 – springs; 6 – hermetic connection of the cover with the body; 7 – body; 8 – neodymium rotor magnets; 9 – stator coil winding (K1 – K3); 10 – neodymium magnets in the case; 11 – electric rectifier.

The resulting electrical energy can be used to power various devices or can be stored for later use, for example, in rechargeable batteries.

Consider a magnetic generator. Let's take a look at its components and principle of operation. The magnetic generator comprises a housing 1 made of a non-magnetic material, on which the cores and working windings 2 of the stator are fixedly mounted and uniformly distributed around the circumference, at least one core of the working winding 2 of the stator consists of an H-shaped magnetic circuit 3 and four bipolar permanent magnets 4, two of which are fixed on a rotor 5 made of a non-magnetic material, with a shaft 6 (Figure 8) [11, pp. 21-22].

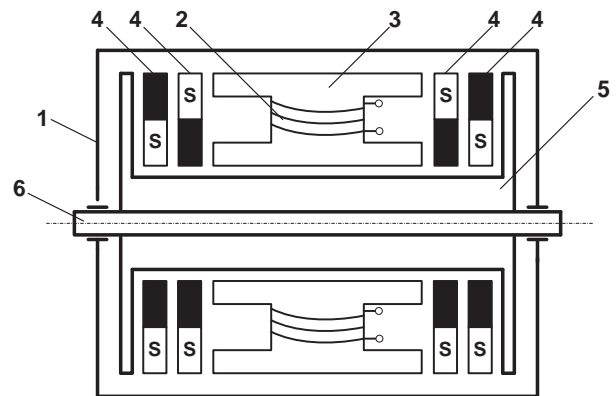


Fig. 8. Magnetic generator on permanent magnets [11, pp. 21-22]

The moving part of the generator is the rotor, which contains magnets or electromagnets. The rotor rotates around its axis. The stationary part of the generator surrounding the rotor is the stator, which contains the coils that play an important role in the process of generating electricity. The magnetic field changes, when the rotor rotates, which causes electromagnetic induction. The coils on the stator are subject to an alternating magnetic field, which generates an electric current in these coils.

In some magnetic generators, a commutator can be used to periodically change the direction of the current, i.e. to convert alternating current to direct current.

The interaction of the magnetic field, rotor and stator coils results in the induction of an electric current. This current can be output and used to power electrical appliances or stored in batteries for later use. It is important to note that such a generator

can use both permanent magnets and electromagnets powered by an electric current to generate a magnetic field.

Conclusion. Having reviewed the systems and devices designed to generate electrical energy, it can be concluded that the principle of electromagnetic induction is an extremely important discovery that has brought and will continue to bring great benefits to humanity in addressing its urgent needs.

As for the demand of the world's population for energy resources, it will not only remain extremely high, but will continue to grow, and there are unlikely to be sufficient resources to meet it, so from time to time there will be a need to look for new ways to generate electricity, and therefore there is a chance that scientists and engineers will invent even newer and more advanced ways to apply the principle of electromagnetic induction to generate electricity in large volumes.

Bibliography:

1. Interaction of gravitational waves with a tidal power plant / V.A. Voskoboinik, V.V. Yakovlev, V.V. Khomitsky [et al.]. *Renewable energy*. 2020. № 4. Pp. 59-68. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).59-68](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).59-68).
2. Gnatov, A. V., Argun, S. V. Energy-generating tiles as an alternative low-power source of electric energy. *Automobile transport*. 2017. Issue 40. Pp. 167-172. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.40.0.167>
3. Melnyk O. O., Tsventukh M. Y. Tidal energy of the world ocean as a source of alternative electricity. *The 8 th International scientific and practical conference "Dynamics of the development of world science" (April 15-17, 2020)*. Vancouver, Canada : Perfect Publishing, 2020. Pp. 565-572. URL: https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2020/04/DYNAMICS-OF-THE-DEVELOPMENT-OF-WORLD-SCIENCE_15-17.04.20.pdf
4. «La Rance», France. URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-5>
5. Albert. P. D. Electro-Magnetic Induction: Free Electricity Generator. *International journal of Engineering Research and Technology*. 2017. № 5. Pp. 1-13. URL: https://www.researchgate.net/publication/324030058_ELECTRO-MAGNETIC_INDUCION_FREE_ELECTRICITY_GENERATOR
6. Bisht, P., Rawat, R. Electricity Generation through Road Ribs using law of Electromagnetic Induction. *Conference on Advances in Communication and Control Systems*. 2013. № 4. Pp. 714-718. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Electricity-Generation-through-Road-Ribs-using-law-Bisht-Rawat/7bc49297cfc6d59e1394e862540e6f5e73e5c888>
7. CorPower. URL: <https://portaltele.com.ua/equipment/electricity/plavuchij-hvilovij-generator-buj-na-850-kvt-projshov-viprobuvannya.html>
8. Hartel, H. Electromagnetic Induction: An Alternative for Teaching and Understanding European. *Journal of Physics Education*. 2018. Vol. 9, Issue 2. Pp. 1-13. URL: https://www.researchgate.net/publication/344809618_Electromagnetic_Induction_An_Alternative_for_Teaching_and_Understanding
9. Patero, J. Electromagnetic Induction: Unraveling Faraday's Laws and their applications in generators and transformers. *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*. 2023. July. Pp. 814-819. DOI:10.48175/IJARSCT-12376.
10. Rucker, Jonathan E. Design and analysis of a permanent magnet generator for naval applications. *Calhoun: The NPS Institutional Archive / Dudley Knox Library ; Naval Postgraduate School*. 2005. № 6. Pp. 19-26.
11. Torres, E. Ponce, P. Arturo Molina Electromagnetic induction generator toward energy harvesting for dynamic systems. *International Conference on Industrial Technology (ICIT) (March, 2017) : abstracts of the conference*. 2017. Pp. 418-422. URL: https://www.researchgate.net/publication/316907839_Electromagnetic_induction_generator_toward_energy_harvesting_for_dynamic_systems
12. Waveline Magnet. URL: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/686936/>

Антипчук Б.О., Новосилецький Ю.Л., Лавріщев О.О. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ ЯК ОСНОВА НЕТРАДИЦІЙНИХ МЕТОДІВ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Ця стаття присвячена досить актуальному питанню сьогодення, яке дозволить вирішити енергетичні потреби людства, а саме – альтернативній енергетиці. Проте, розглядаються не просто традиційні об'єкти нетрадиційної електроенергетики, а саме можливості застосування базового закону електротехніки – принципу електромагнітної індукції. У статті розкрито цілий аспект можливостей генерації електричної енергії з поновлювальних джерел енергії за рахунок електромагнітної індукції, таких як плаваючі генератори електричної енергії, енергія припливів та хвиль, кінетична енергія рухомих об'єктів та магнітні генератори.

Також описано саме явище електромагнітної індукції, розкрито, завдяки яким властивостям електромагнітна індукція набула величезного значення для науки, адже це явище набуло практичного застосування в багатьох галузях промисловості та науки, наприклад: радіотехніка, медицина, енергетика, різноманітні побутові прилади, безпроводна передача електроенергії, сучасні технології

комунікації тощо. Розкрито особливе значення при застосуванні принципу електромагнітної індукції в альтернативній енергетиці постійних магнітів.

Зроблено огляд вже існуючих у світі інженерних розробок, діяльність яких базується на принципі електромагнітної індукції, та які вже довели свою практичність і енергетичну ефективність. З'ясовано, що капітальні енергетичні проекти дозволяють значно заощаджувати на фінансових витратах у генерацію електричної енергії, завдяки чому є можливість отримувати електрику з поновлювальних джерел енергії.

Описано принцип роботи вже існуючих у світі кожної установки окремо, принцип роботи яких базується на електромагнітній індукції. Розкрито методiku застосування цього явища в роботі та структурі кожної з них для вироблення електрики з невичерпних, поновлювальних джерел енергії. Також ознайомлено користувачів наукової інформації з будовою та принципом роботи магнітного генератора, який відноситься до розробок в галузі електротехніки та працює на постійних магнітах. В статті зроблено акцент на те, що такий генератор на постійних магнітах можна застосовувати для освітлення приміщення, що особливо актуально в умовах нашого сьогодення, також його можна використовувати в легкій промисловості для живлення обладнання виробничих процесів.

Як підсумок проведеного дослідження, в статті зосереджено увагу на тому, що потреби населення на енергетичні ресурси будуть тільки зростати, тому таке важливе відкриття, як принцип електромагнітної індукції, дозволить інженерам та науковцям реалізувати ще більш прогресивні методи генерації електричної енергії за рахунок даного явища.

Ключові слова: електромагнітна індукція, магнітний генератор, кінетична енергія, альтернативна енергетика, енергія хвиль і припливів, плавучий генератор, постійні магніти.

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/11>**Гребьонкін Є.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Заворотний В.Ф.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИКОРИСТАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ В ГАЗОВИХ МЕМС СЕНСОРАХ

Газові сенсори є важливими елементами для моніторингу якості повітря, контролю промислових викидів та забезпечення безпеки в багатьох сферах. Останні досягнення в мікроелектромеханічних системах (МЕМС) дозволяють створювати сенсори з компактними розмірами, низьким енергоспоживанням та високою чутливістю. Однак традиційні матеріали, такі як металооксиди, мають низьку селективність, повільний відгук та обмежений термін служби. Застосування наноматеріалів, включаючи вуглецеві нанотрубки, наночастинки металів, графен та напівпровідникові нанодроти, відкриває нові перспективи у розробці МЕМС сенсорів для підвищення їх чутливості, селективності та стабільності. У роботі проаналізовано принципи дії різних типів МЕМС сенсорів, таких як резистивні, оптичні, акустичні та теплові, з акцентом на їх переваги та обмеження. Розглянуто приклади вдосконалення сенсорів за рахунок модифікації наноматеріалами, зокрема використання оксидів металів, гібридних структур, графену та нанодротів. Особливу увагу приділено механізмам взаємодії газів із чутливими шарами на основі наноматеріалів. Проаналізовано переваги гетероструктур ZnO/TeO₂ у сенсорах NO₂, модифікацію ZnO графеном в сенсорах CO та використання нанодротів ZnO:GaNWs/MEMS в сенсорах H₂S. У роботі наведено результати порівняльного аналізу робочих характеристик МЕМС сенсорів різних типів, включаючи чутливість, час відгуку, вибірковість та робочі температури. Показано, що наноматеріали дозволяють розробляти ефективніші сенсорні системи завдяки їх унікальним фізико-хімічним властивостям, таким як висока площа поверхні, електропровідність та стабільність. Зроблено висновок про перспективність інтеграції наноматеріалів у сенсорні системи для вирішення сучасних задач газового аналізу, зокрема моніторингу токсичних газів у режимі реального часу. Подальші дослідження спрямовані на оптимізацію технологій синтезу та інтеграції наноматеріалів у МЕМС структури для створення сенсорів нового покоління, які поєднують високу ефективність із доступністю та довговічністю.

Ключові слова: МЕМС, газові сенсори, наноматеріали, нанотехнології.

Постановка проблеми. Швидка урбанізація та індустріалізація спричинили серйозну проблему забруднення повітря. Це помітно через збільшення кількості шкідливих і забруднюючих газів, що викидаються в навколишнє середовище. Серед цих забруднювачів – леткі органічні сполуки (ЛОС), а також токсичні гази, такі як вуглекислий газ, аміак, бензол, етанол і формальдегід [1, с. 98]. Присутність токсичних газів і ЛОС є небезпечною як для здоров'я людей, так і для довкілля. Серййозне забруднення повітря може знижувати функцію легень, викликати їх пошкодження та підвищувати уразливість людей до захворювань, таких як MERS-CoV та COVID-19 [2, с. 379]. Отже, виникає гостра потреба у ефективних методах моніторингу токсичних газів і ЛОС. З цією метою використовуються високочутливі аналітичні

методи, такі як газова хроматографія, спектрофотометрія та високоефективна рідинна хроматографія [3, с. 681]. Попри свою точність, ці методи мають недоліки, зокрема високу вартість, відсутність портативності та значне енергоспоживання. Крім того, для їх використання потрібна складна та тривала підготовка зразків, а також висококваліфікований персонал. Такі методи не здатні забезпечити отримання інформації про рівень впливу газів у режимі реального часу. Тому виникає потреба у доступних, компактних і зручних у використанні сенсорах газу. У цьому контексті мікроелектромеханічні системи (МЕМС) відіграють важливу роль [3, с. 681]. МЕМС-технології активно впроваджуються у сферу сенсорики завдяки перевагам, таким як висока чутливість, низьке енергоспоживання, компактні розміри та

значно нижча вартість виробництва порівняно з традиційними газовими сенсорами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній літературі приділено значну увагу розробці різних видів газових сенсорів МЕМС. Серед таких сенсорів виділяють кілька основних типів за принципом дії: резистивні [4, с. 314], оптичні [5, с. 94], акустичні [6, с. 2] та теплові [3, с. 681]. Зазвичай, в МЕМС газових сенсорах використовують оксиди металів, такі як SnO₂ і ZnO, які забезпечують високу чутливість, проте характеризуються низькою селективністю [7, с. 128999; 8, с. 2497]. На сьогодні розроблено МЕМС сенсори для детекції таких газів, як CO, H₂, NO₂, NH₃, CH₄, а також ЛОС [3, с. 681]. Наприклад, сенсори на основі SnO₂ активно використовуються для моніторингу горючих газів [3, с. 681], тоді як п'єзоелектричні пристрої знаходять застосування для контролю CO₂ у промислових умовах [3, с. 681]. Теплові сенсори ефективно використовуються для аналізу водню завдяки високій точності вимірювань [3, с. 681]. Однак сенсори, виготовлені з традиційних матеріалів, таких як оксиди металів, часто мають низьку селективність, чутливість до змін температури та вологості, а також швидке зношування. Це створює необхідність пошуку нових матеріалів і технологій, які могли б усунути ці недоліки. Одним із перспективних напрямів є застосування наноматеріалів, які завдяки своїм унікальним фізико-хімічним влас-

твостям можуть значно покращити характеристики МЕМС газових сенсорів.

Постановка завдання. Метою статті є проведення аналізу сучасних досліджень і оцінки перспектив використання наноматеріалів у МЕМС газових сенсорах, а також виявлення ключових напрямів для подальшого вдосконалення цих пристроїв.

Виклад основного матеріалу. Принцип дії та класифікація МЕМС газових сенсорів.

МЕМС газові сенсори базуються на зміні фізичних або хімічних властивостей чутливого шару при взаємодії з газом. Тому на сьогодні газові сенсори МЕМС за принципом дії можна поділити на наступні групи: резистивні [9, с. 107], оптичні [5, с. 95] та акустичні [6, с. 3] (рис. 1). Також на сьогодні досить перспективним є використання теплових ефектів в МЕМС газових сенсорах [3, с. 681].

Резистивний сенсор газу працює шляхом зміни опору чутливого елемента в результаті хімічних реакцій, що відбуваються під час процесів адсорбції та десорбції газу на поверхні чутливого матеріалу. Зміна провідності чутливого матеріалу перетворюється на вимірюваний електричний сигнал.

На початку 60-х років було винайдено перший газовий сенсор на основі оксиду металу, що використовував плівки оксиду цинку (ZnO) для визначення вуглекислого газу [4, с. 316]. Відтоді технологія сенсорів на основі оксидів металів активно

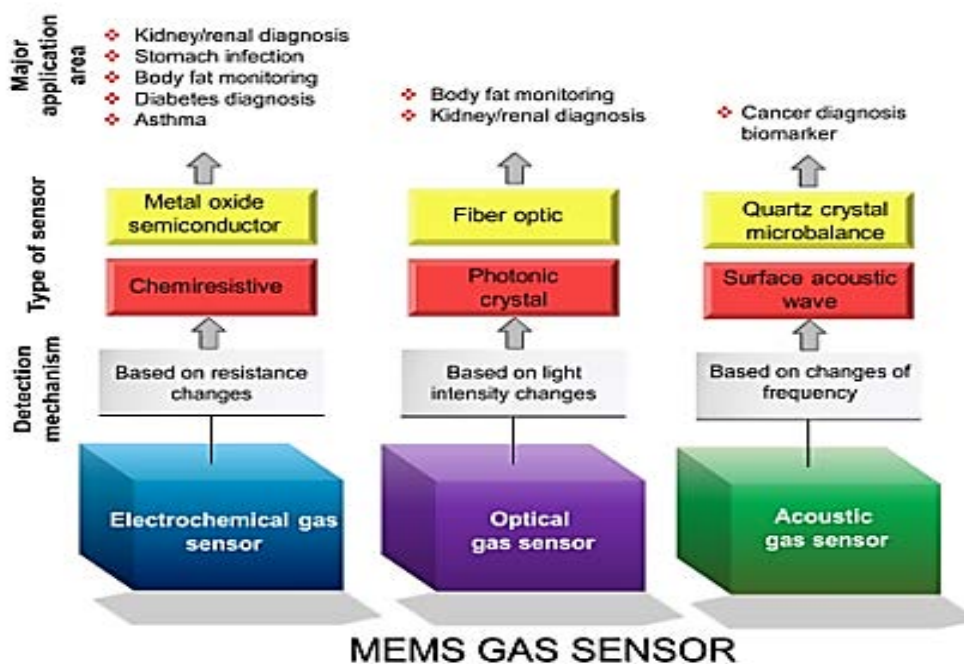


Рис. 1. Класифікація МЕМС-сенсорів газу [10, с. 18381]

досліджується для розширення її можливостей у більш широкому спектрі застосувань. Схема структури сенсора газу МЕМС наведена на рис. 2. Датчик має два металеві шари, розділені діелектриком: нижній метал слугує нагрівачем, тоді як верхній метал забезпечує електричне з'єднання з оксидом металу. Основний механізм роботи таких сенсорів базується на зміні вмісту хемосорбованого кисню на поверхні через присутність цільового газу. Металооксидні сенсори поділяються на n-тип і р-тип залежно від типу чутливого матеріалу, що обумовлює різну реакцію на той самий газ. При контакті з окислювальними газами, які діють як акцептори, для напівпровідників n-типу має місце зростання опору, а для р-типу – його зменшення.

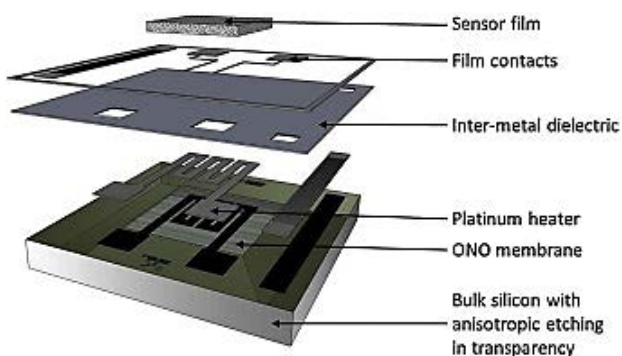


Рис. 2. Послідовність виготовлення газового МЕМС сенсора резистивного типу [11, с. 229]

Для відновлювальних газів, що діють як донори, спостерігається зворотний ефект: зменшення опору для n-типу і збільшення для р-типу. Металооксидні сенсори відомі своєю стабільністю, безпечністю, низькою вартістю та високою чутливістю до газів, особливо легких органічних сполук. Вони широко застосовуються в комерційних, побутових та промислових системах газового моніторингу [10, с. 18381]. Проте вони мають значний недолік – високе енергоспоживання через необхідність високих робочих температур (150–400°C) [4, с. 317; 12, с. 2090].

Оптичні сенсори газу. Сенсори газу на основі фотонно-кристалічних резонаторів та волоконно-оптичні газові сенсори є двома найпоширенішими типами оптичних МЕМС-сенсорів. З моменту винаходу оптичного волоконного ендоскопа в першій половині 20-го століття, волоконно-оптичні сенсори зазнали значного прогресу в галузі газової сенсорики [13, с. 1989]. Волоконно-оптичні газові сенсори привернули увагу дослідників завдяки своїм характеристикам виявлення та здатності моніторити токсичні гази. Волоконно-оптичні сенсори складаються з чутливої області, серцевини

та оболонки. Якщо показник заломлення зовнішнього шару менший, ніж у внутрішньої серцевини волокна, світло зазнає повного внутрішнього відбиття і буде поширюватися лише в серцевині [5, с. 95]. З іншого боку, якщо показники заломлення оболонки та серцевини близькі, світло буде проникати в оболонку. Для виготовлення волоконно-оптичних газових сенсорів необхідно видалити частину оболонки і на її місце нанести чутливий шар з великим показником заломлення, утворюючи модифіковану оболонку (рис. 3). В результаті утворюється газо-сенсорний інтерфейс між модифікованою оболонкою та газом. У присутності цільових газів оптичні властивості цієї модифікованої оболонки змінюються, і в результаті показник заломлення чутливого шару змінюється [14, с. 209]. Такі сенсори дозволяють виявляти незначні зміни вмісту газу, що пов'язані з амплітудою світлового імпульсу та часом його спаду.

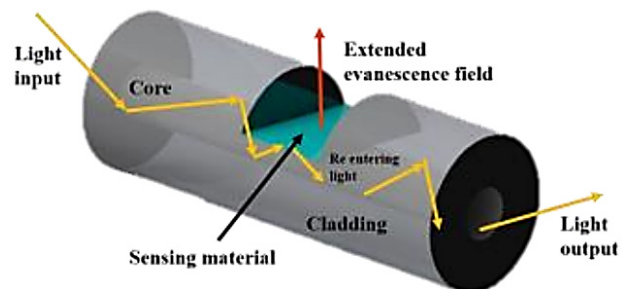


Рис. 3. Схематичне зображення оптичного МЕМС-сенсора газу [10, с. 18381]

Незважаючи на те, що волоконно-оптичні газові сенсори мають кілька переваг порівняно з іншими газовими сенсорами, зокрема високу чутливість, селективність і стабільність [15, с. 23325], вони мають обмеження в мініатюризації джерела світла та фотодетектора [16, с. 135]. Також вони схильні до впливу навколишнього світла, що створює перешкоди.

Акустичні газові сенсори отримали свою назву завдяки використанню механічної або акустичної хвилі для детекції газів [17, с. 69]. Акустичні сенсори забезпечують значно кращу здатність виявлення газу завдяки взаємодіям, які можуть бути виявлені навіть при низьких рівнях концентрації газів.

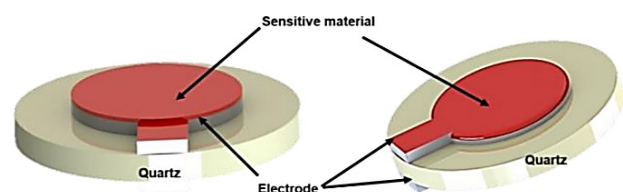


Рис. 4. Схематичне зображення акустичного газового сенсора МЕМС [10, с. 18381]

У 1959 році Саурбрай та ін. заявили, що зміна частоти кварцового резонатора (QCM) прямо пропорційна збільшенню маси і запропонували рівняння Саурбрай [18, с. 207]. З того часу кварцові кристали використовуються в багатьох застосуваннях, зокрема в газових сенсорах. Рис. 4 показує базовий сенсор QCM, який складається з кварцового кристала, розташованого між двома електродами, і чутливого матеріалу, нанесеного на верхній електрод. Основний механізм роботи QCM можна пояснити за допомогою рівняння Саурбрай [18, с. 212], яке наведене в рівнянні (1):

$$\Delta f = \frac{2f_0^2}{\sqrt{\rho_q u_q}} \frac{\Delta m}{A} \quad (1)$$

де Δf та Δm – зміна резонансної частоти кварцу (Гц) та зміна маси (г), пов'язані з поверхневим адсорбуванням на QCM; f_0 – основна частота кварцу (Гц); A – активна площа плівки QCM на електроді (см²); ρ_q і u_q – густина (г/см³) і шорсткість модуля (Па) п'єзоелектричного кварцового кристала відповідно.

Газові сенсори QCM виявляють зміну маси чутливої плівки шляхом вимірювання зміни резонансної частоти кварцу. Коли газ вивільняється, молекули чутливого матеріалу абсорбують цільовий газ, що призводить до зміни маси, Δm , і зменшення резонансної частоти кварцу [19, с. 92672; 20, с. 128944]. Зазвичай сам кварц не має газочутливих властивостей, тому поверхня QCM повинна бути покрита тонкою плівкою газочутливих матеріалів з адсорбційними властивостями, щоб забезпечити адсорбцію між цільовим газом та чутливим матеріалом [21, с. 216]. Чутливі матеріали для газових сенсорів QCM, такі як металеві оксиди та полімери, можна виготовити фізичними та хімічними методами, такими як метод преципітації [22, с. 779], гідротермальний синтез [23, с. 209], метод синтезу з мікроемulsії [24, с. 3] і розчинників [25, с. 94]. Проте у сенсорів QCM є кілька обмежень, таких як складні процеси виготовлення, низьке співвідношення сигнал/шум через поверхневу інтерференцію [17, с. 72] та обмежена селективність.

Теплові газові сенсори працюють на принципі вимірювання змін теплофізичних параметрів газу, що залежать від складу газу чи газової суміші. Цей метод зазвичай використовується для виявлення газів із високою теплопровідністю, більшою за теплопровідність повітря, наприклад, водню та метану, тоді як гази з теплопровідністю,

близькою до повітря, такі як аміак і чадний газ, не можуть бути легко виявлені [26, с. 71].

Такі газові сенсори функціонують на основі вимірювання теплопровідності газів за допомогою двох термочутливих резисторів, один із яких контактує з досліджуванним газом, а інший розташований у середовищі референтного газу (зазвичай повітря). Ці резистори підключені до мостової схеми Уїтстона, яка використовується для точного вимірювання змін опору. Коли обидва резистори знаходяться в однаковому газовому середовищі, їх тепловтрати однакові, що забезпечує баланс у мостовій схемі, і вихідний сигнал дорівнює нулю. Однак, при зміні теплопровідності газу на боці вимірювального резистора, тепловтрати цього резистора змінюються. Це, своєю чергою, призводить до зміни його температури, що впливає на електричний опір. Виникає дисбаланс у мостовій схемі, який фіксується у вигляді вихідного електричного сигналу. Теплові сенсори залишаються ефективним методом для аналізу бінарних газових сумішей завдяки їх чутливості до відмінностей у теплопровідності досліджуваного газу та референтного середовища.

З точки зору будови, тепловий MEMS сенсор газу є мініатюрним пристроєм, що включає кілька ключових компонентів, інтегрованих на MEMS підкладці (рис. 5). Центральним елементом сенсора є мікронагрівач, який виконаний у вигляді резистивного елемента, що генерує тепло та створює локальний температурний градієнт у зоні сенсора. Поруч із мікронагрівачем можуть розміщуватися чутливі елементи, такі як терморезистори або термопари, які здійснюють вимірювання змін температури, що виникають через теплові властивості аналізованого газу. В іншому випадку, сам резистивний нагрівач використовується в якості чутливого елемента [27, с. 233]. Сенсор має мікроструктуровану підкладку, що забезпечує механічну підтримку та оптимізує теплові втрати завдяки використанню матеріалів з низькою теплопровідністю. Аналізований газ проходить через канал, що взаємодіє з чутливими елементами, викликаючи зміни в теплопровідності, які детектуються. Останнім компонентом є електронна схема зчитування, що забезпечує обробку сигналів, отриманих від змін опору або напруги чутливих елементів, та їх подальшу інтерпретацію для визначення властивостей досліджуваного газу.

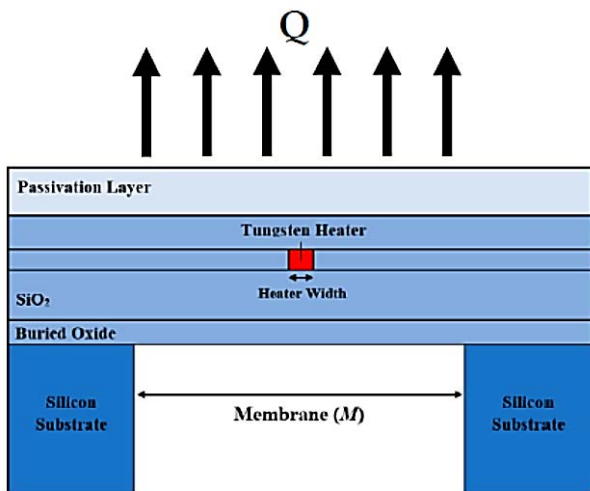


Рис. 5. Схематичне зображення теплового газового сенсора MEMC [26, с. 71]

Наразі спостерігається, що теплові сенсори газу не отримали широкого застосування через дві основні причини: слабку селективність та відносно низьку чутливість. Однак вони мають багато переваг, зокрема високу стабільність, низьку вартість, мале енергоспоживання, відсутність адсорбції та каталізу, швидкий час відгуку, тривалий термін експлуатації та компактний розмір. Останні розробки в науковій літературі зосереджені на покращенні чутливості, оскільки це основні бар'єри, які необхідно подолати для розвитку таких сенсорів [3, с. 681].

Нанотехнологічні підходи до виготовлення MEMC газових сенсорів. Перехід до використання наноструктур у MEMC газових сенсорах зумовлений необхідністю подолання недоліків традиційних матеріалів, які були описані вище. Незважаючи на значний прогрес у розробці MEMC сенсорів, існуючі пристрої часто мають обмежену селективність, повільну реакцію та залежність від зовнішніх умов, таких як температура та вологість. Включення наноструктур до складу чутливих елементів є одним із можливих способів покращення характеристик сенсорів завдяки їхнім унікальним фізико-хімічним властивостям. Наноматеріали, які на сьогодні використовуються в складі MEMC сенсорів газу, можна класифікувати на декілька груп залежно від їхньої хімічної природи: оксидні наноматеріали [28, с. 134891], вуглецеві наноматеріали [29, с. 207954], напівпровідникові нанодрої [30, с. 109149]. Оксидні наноматеріали являють собою плівки традиційних матеріалів, такі як SnO_2 , ZnO , TiO_2 , модифікованих наночастинками інших металооксидів, що покращує їх каталітичні властивості та селективність, утворюючи гібридні

наноструктури. Вуглецеві наноматеріали використовують в MEMC газових сенсорах через їх високі електронно-провідні властивості, хімічну інертність та високу селективність. Напівпровідникові нанодрої, виготовлені з металооксидів чи кремнію, мають високе співвідношення поверхні до об'єму, що збільшує кількість активних місць для адсорбції молекул газу.

Спочатку оглянемо перший тип модифікації, а саме наночастинками металооксидів. Немодифікований чутливий елемент з плівки оксиду цинку ZnO проявляє низьку чутливість до газу NO_2 . Щоб підвищити чутливість поверхні ZnO , було запропоновано додаткове осадження наночастинок TeO_2 в меншій концентрації. Виготовлення чутливого елементу проводили за допомогою імпульсного магнетронного розпилення високої потужності і системою радіочастотного магнетронного розпилення. Обидва катода були активовані одночасно для осадження матеріалів ZnO і TeO_2 . Для отримання плівок оксиду цинку використовувався метод імпульсного магнетронного розпилення високої потужності, а радіочастотне напылення використовується для осадження TeO_2 [28, с. 134891]. Структура сенсора оксиду азоту на основі гетероструктури ZnO/TeO_2 зображена на рис. 6.

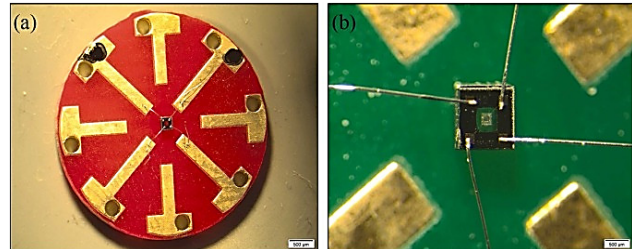


Рис. 6. Зображення готового MEMC сенсора оксиду азоту (а), підключення сенсора до друкованої плати (б) [28, с. 134891]

Даний сенсор має 4 електроди: 2 нагрівальні електроди та 2 чутливі електроди. Нагрівальні електроди підключаються до вхідного джерела живлення, щоб змінювати робочу температуру датчика. Чутливі електроди приєднані до вимірювача опору. Дані, отримані зі зміни опору, використовуються для розрахунку вмісту газу. Принцип дії даного сенсора полягає в тому, що при подачі аналіту опір сенсорі значно зростає. Величина приросту опору визначається концентрацією аналіту: чим більша концентрація, тим більший опір сенсора. Газочутливі властивості структур ZnO/TeO_2 оцінювали шляхом вимірювання зміни опору зі зміною концентрації NO_2 (0,2–1 ppm) за різних температур 50–200°C [28, с. 134891].

Механізм визначення газу наноструктурою ZnO і TeO₂ здебільшого заснований на утворенні збідненого шару та утворенні гетеропереходу між ZnO і TeO₂. У присутності повітря молекули кисню адсорбуються на поверхні наноструктури, приймаючи вільні електрони із зони провідності. Загалом, при робочих температурах менше, ніж 150 °C, іони кисню O₂⁻ домінують у формуванні, ніж інші типи іонів кисню [28, с. 134891]. Цей кисень адсорбується на поверхні наноструктури, і створює область збіднення. У присутності газу NO₂ відбувається реакція з вільними електронами структури ZnO/TeO₂ і утворює NO₂⁻ і вивільняє назад кисень. Використання більшої кількості вільних електронів газом NO₂ розширює область збіднення навколо наноструктури. Видалення більшої кількості електронів із зони провідності збільшує опір датчика в присутності газу NO₂ [31, с. 697].

Модифікація ZnO/TeO₂ призвела до покращення чутливості сенсору майже в 20 разів порівняно з немодифікованим оксидом цинку (при температурі 100°C). Дослідження селективності сенсору на основі структури ZnO/TeO₂ показують, що даний сенсор практично нечутливий до NH₃, CO, H₂S і NO₂. Також досліджувалась повторювальність та швидкодія роботи сенсорів до дії цільового газу (при температурі 100°C). Так, повторювальність сигналу сенсора була протестована під час восьми різних циклів, в результаті чого продемонстровано відхилення у відгуку сенсора ± 2%. Час відгуку та відновлення є одним із головних факторів у виявленні токсичних газів. Сенсор на основі наноструктури ZnO/TeO₂ має швидкий час відгуку 13 с і час відновлення 38 с при концентрації газу NO₂ 1 ppm.

Далі розглянемо детально випадок модифікації вуглецевими наноматеріалами, а саме відновленим графеном (GrO). З метою покращення робочих характеристик сенсорів монооксиду вуглецю запропоновано використання відновленого графену (ZnO/GrO [32, с. 264]). Механізм чутливості хімічних сенсорів на основі ZnO описаний вище і здійснюється через хемосорбований кисень на поверхні оксиду металу [33, с. 45]. Відновлення таких газів, як CO та NH₃, призводить до зниження парціального тиску кисню, що призводить до вивільнення захоплених поверхнею електронів назад у зону провідності ZnO, отже, що викликає зменшення опору датчика або збільшення струму. Таким же чином газ-окислювачі (NO) призводять до збільшення опору, збільшуючи покриття сорбованого іонами кисню.

Щоб отримати сенсор на основі ZnO/GrO, спочатку було отримано оксид графену модифікованим методом Хаммера. Далі були синтезовані наночастинки оксиду відповідно до методу, описаного в літературі [35, с. 2862]. Наступним кроком було утворення суміш розчинів цих двох сполук, який ретельно оброблявся ультразвуком, а кінцевий розчин витримували протягом 24 год, щоб забезпечити повне відновлення GO та Zn (Ac)₂·2H₂O.

Модифікація ZnO за допомогою GrO надала сенсору змогу проявляти чутливість до монооксиду вуглецю (при кімнатній температурі), адже початково сенсор не відчував цей газ навіть при високих температурах. Відносна змінна провідності становила +24.3% при концентрації CO 22 ppm. Дослідження селективності сенсору на основі структури ZnO/GrO показують погану реакцію на окислювальні гази (NO), і тому можна стверджувати, що сенсор є селективним. Однією з суттєвих переваг даної модифікації датчика на основі оксиду графену та оксиду цинку є велике електричне підсилення, що забезпечується графеном завдяки його майже металевій провідності (підвищення чутливості), а також усуває необхідність термічної активації наночастинок ZnO, таким чином сенсор може працювати за кімнатної температури.

Наступним типом модифікації є використання нанодродів, тобто перехід чутливого елемента з плівки в 1D структуру. Для покращення MEMS сенсорів сірководню (H₂S) було запропоновано використати в якості чутливого шару нанодропи оксиду цинку, легованого галієм (ZnO:Ga NWs/MEMS) [30, с. 109149].

Механізм дії модифікатора полягає в наступному. Молекули кисню (O₂) приєднуються до поверхні тонкої плівки ZnO, ZnO NWs та ZnO:Ga NWs, а потім молекули O₂ захоплюють електрони на поверхні ZnO NWs та ZnO:Ga NWs, утворюючи іони кисню (O₂⁻). При цьому опір чутливого матеріалу через взаємодію з H₂S зменшується, в результаті реакції H₂S з O₂⁻ з утворенням оксидів сірки (SO₂) і молекул води (H₂O) [35, с. 6335]. В наслідок цього захоплені електрони вивільняються, струм у чутливому матеріалі збільшується, а опір чутливого матеріалу зменшується [36, с. 166158].

Виробництво сенсорів базується на стандартній інтегральній технології, що включає процеси нанесення тонких плівок, фотолітографії та травлення (рис. 7). Структура MEMS складається з підвісної структури, ізоляційного шару,

Порівняльна таблиця робочих параметрів різних типів газових сенсорів MEMS

Чутливий матеріал	Цільовий газ	Робочі температури, °C	Межа виявлення	Чутливість	Час відгуку відновлення	Посилання
Резистивні сенсори						
TiO ₂	Аміяк	350	56 ppm	1 Ra/Rg	-/-	40
ZnO pyramid	C ₅ H ₈	300-350	1 ppm	1371 Ra/Rg	-/1800	31
ZnO doped indium oxide	NO ₂	167	0.1–100 ppm	24.2 Rg/Ra	180/-	33
ZnO/TeO ₂	NO ₂	50	0.2 ppm	80 Rg/Ra	13/38	28
ZnO/GrO	CO	Кімнатна	22 ppm	24.3% ΔG	300/300	29
ZnO	CO	350	50 ppm	Нечутливий	-	37
ZnO:Ga NWs/MEMS	H ₂ S	Кімнатна	0,1-0,8 ppm	20.7%	22.4/16,8	30
Ni-ZnO nanorods	NO ₂	200	5	135%	2,75/60,5	38
NiO thin films	NO ₂	200	20	57%	200/400	39
Оптичні сенсори						
Bismuth tungstate (Bi ₂ WO ₆) nanomaterials	NH ₃	Кімнатна	0-500 ppm	5 Counts/кпа	-/-	40
NiO doping with reduced graphene oxide(rGO) composite	CO ₂	Кімнатна	0- 500 ppm	83 Counts/кпа	16/22	41
GO	CH ₃ OH	27	0-500 ppm	-0.20 counts ppm ⁻¹	-/-	42
Nanostructures Manganese nitrate/Cobalt nitrate/Urea/Liquid ammonium hydroxide solution (MnCO ₂ O ₂)	C ₂ H ₅ OH	Кімнатна	0-500 ppm	-0.55 counts ppm ⁻¹	660/2700	43
Акустичні сенсори						
ZnO nanowires	NH ₃	Кімнатна	1000 ppm	- 956 Hz/ ppm	4/30	44
Polyaniline/Graphene	NH ₃	Кімнатна	100 ppm	11.33 (100 ppm)	50/23-	45
ZnO nanorods	CO	Кімнатна	150 ppm	Δf=0.62 Hz/ ppm	226/368	46
Ferrocene-chitosan	CO	Кімнатна	0-2000 ppm	Δf=108.85 Hz/ ppm	38/64	47

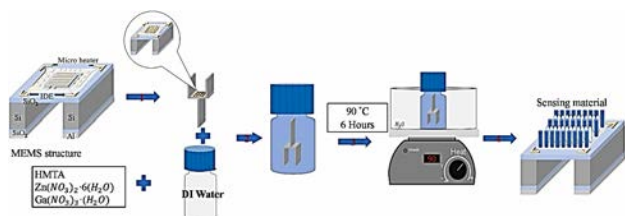


Рис. 7. Схематична діаграма структури газового сенсора на основі нанодоту ZnO, легованого Ga [30, с. 109149]

зустрічно-штирьової гребінки і мікронагрівача. Підвісна конструкція запобігає дифузії температури по мірі старіння датчика. Мікронагрівач виконує роль джерела тепла. Зустрічно-штирьова гребінка вимірює опір чутливого матеріалу. Далі було виготовлений розчин з чутливим матеріалом. Для синтезу нанодотів ZnO використовувався гідротермальний метод. Потім нанодоти ZnO були вирощені на структурі MEMS. Датчик ZnO NWs/MEMS помістили в піч для відпалу при 300°C на 4 год.

Газочутливі властивості ZnO:GaNWs/MEMS оцінювали шляхом вимірювання зміни опору зі змі-

ною концентрації сірководню в межах 0,1–80 ppm при температурі $31,7 \pm 0,5^\circ\text{C}$ та відносній вологості (RH) – $48,1 \pm 1,5\%$ [30, с. 109149]. Чутливість визначалася як відносна зміна опору, і при концентрації H₂S 0,8 ppm становила 20,7%. Дослідження швидкодії сенсора показали, що середній час відгуку становить 22,4 с, а середній час відновлення – 16,8 с. Для дослідження селективності сенсора були обрані наступні гази CO, CO₂, H₂, H₂S і діоксиду сірки (SO₂), концентрації яких становили приблизно 10 ppm, 800 ppm, 10 ppm, 0,8 ppm і 1 ppm. Обрані концентрації залежали від рівнів небезпечної концентрації даних газів. Датчик газу ZnO:Ga NWs/MEMS майже не реагує на такі гази, як CO, CO₂, H₂ і SO₂, тому можна стверджувати, що сенсор має непогану селективність.

З табл. 1 видно, що різні наномодифікації поверхні газових MEMS сенсорів позитивно впливають на основні характеристики таких приладів. Зокрема всі модифікації значно знижують робочі температури сенсорів, розширюють нижню межу робочого діапазону до 0.1 ppm. Це розширення збільшує можливість використання даних

сенсорів в побуті, адже концентрація 0,1 ppm газу є меншою, аніж межа вибухонебезпечності більшості газів. Також всі наномодифікації поверхні сенсорів значно покращили відгук сенсорів до цільового газу в порівнянні до модифікації, забезпечуючи тим самим високу селективність MEMC газовим сенсорам. В деяких випадках використання наноматеріалів в таких приладах значно покращує швидкодію сенсора, час відгуку/відновлення досягав 2,75/16,8 відповідно.

Висновки. Використання наноматеріалів у MEMC газових сенсорах є перспективним напрямом розвитку, який дозволяє подолати обмеження традиційних матеріалів. Графен, вуглецеві нанотрубки, наночастинки металів та нанодропи є ключовими компонентами, що забезпечують підвищення чутливості, селективності та стабільності пристроїв.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію технологій синтезу та інтеграції цих матеріалів у MEMC структури для розробки сенсорів нового покоління.

Список літератури:

1. Linevych Y., et al. 1D Silicon Nanostructures for Detection of Volatile Organic Compounds. *2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2024. Pp. 98-102. <https://doi.org/10.1109/ELNANO63394.2024.10756859>
2. Sorensen C., et al. Reducing the health impacts of ambient air pollution. *bmj*. 2022. P. 379. <https://doi.org/10.1136/bmj-2021-069487>
3. Gardner E. L., Gardner J. W., Udrea F. Micromachined thermal gas sensors—A review. *Sensors*. 2023. P. 681. <https://doi.org/10.3390/s23020681>
4. Hassanzadeh N., Omidvar H., Tabaian S. H. Chemical synthesis of high density and long polypyrrole nanowire arrays using alumina membrane and their hydrogen sensing properties. *Superlattices and Microstructures*. 2012. Pp. 314-323. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2011.12.001>
5. Sharifpour-Boushehri S., Hosseini-Golgoo S. M., Sheikhi M. H. A low cost and reliable fiber optic ethanol sensor based on nano-sized SnO₂. *Optical Fiber Technology*. 2015. Pp. 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.05.002>
6. Joseph A., Emadi A. Design and optimization of a multichannel quartz crystal microbalance sensor array for multiple target gas detection. *2019 IEEE SENSORS*. 2019. Pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/SENSORS43011.2019.8956647>
7. Saito N., et al. Highly sensitive isoprene gas sensor using Au-loaded pyramid-shaped ZnO particles. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021. P. 128999. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128999>
8. Soltabayev B., Mentbayeva A., Acar S. Enhanced gas sensing properties of In doped ZnO thin films. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Pp. 2495-2500. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.157>
9. Steffes H., et al. Enhancement of NO₂ sensing properties of In₂O₃- based thin films using an Au or Ti surface modification. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2001. Pp. 106-112. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(01\)00799-7](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00799-7)
10. Asri M. I. A., et al. MEMS gas sensors: A review. *IEEE Sensors Journal*. Pp. 18381-18397. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3091854>
11. Bagolini A., et al. Development of MEMS MOS gas sensors with CMOS compatible PECVD inter-metal passivation. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. Pp. 225-232. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.04.116>
12. Wang C., et al. Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors. *Sensors*. 2010. Pp. 2088-2106. <https://doi.org/10.3390/s100302088>
13. De Groen P.C. History of the endoscope [scanning our past]. *Proceedings of the IEEE*. 2017. Pp. 1987-1995. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2742858>
14. Mohebbi M. Refractive index sensing of gases based on a onedimensional photonic crystal nanocavity. *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2015. P. 209. <https://doi.org/10.5194/jsss-4-209-2015>
15. Khan M., et al. A high sensitivity and wide dynamic range fiber-optic sensor for low-concentration VOC gas detection. *Sensors*. 2014. Pp. 23321-23336. <https://doi.org/10.3390/s141223321>
16. Boehning, et al. Carbon monoxide neurotransmission activated by CK2 phosphorylation of heme oxygenase-2. *Neuron*. 2003. Pp. 129-137. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00596-8](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00596-8)
17. Jakubik W. P. Surface acoustic wave-based gas sensors. *Thin Solid Films*. 2011. Pp. 986-993. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.04.174>
18. Sauerbrey G. Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung." *Zeitschrift für physik*. 1959. Pp. 206-222. <https://doi.org/10.1007/BF01337937>
19. Joseph A., Emadi A. A High Frequency Dual Inverted Mesa QCM Sensor Array with Concentric Electrodes. *IEEE Access*. 2020. Pp. 92669-92676. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995265>
20. Tang L., et al. Sensitive and renewable quartz crystal microbalance humidity sensor based on nitrocellulose nanocrystals. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021. P. 128944. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128944>

21. Swaminathan S., Emadi A. Mass Sensitivity Analysis of a Newly Developed Quartz Crystal Microbalance with Ring-dot Electrode Configuration and Reduced Mass Loading Area. *Eng. Proc.* 2021. P. 32. <http://dx.doi.org/10.3390/Micromachines2021-09563>
22. Wang L., et al. QCM-based aptamer selection and detection of Salmonella typhimurium. *Food chemistry.* 2017. Pp. 776-782. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.104>
23. Zhao Y., et al. Effects of F doping on TiO₂ acidic sites and their application in QCM based gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2010. Pp. 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.09.020>
24. Ju M. S., et al. Dissolution kinetics of metal coating in HNO₃-scCO₂ micro-emulsion using QCM. *Autumn meeting KNS.* 2005.
25. Matsuguchi M., Uno T. Molecular imprinting strategy for solvent molecules and its application for QCM-based VOC vapor sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2006. Pp. 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.02.028>
26. Yunusa Z., et al. Gas sensors: a review. *Sens. Transducers.* 2014. Pp. 61-75. <https://doi.org/10.13074/jent.2015.12.153163>
27. Kommandur S., et al. A microbridge heater for low power gas sensing based on the 3-Omega technique. *Sensors and Actuators A: Physical.* 2015. Pp. 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.07.011>
28. Nagarjuna Y., Hsiao Y. J. TeO₂ doped ZnO nanostructure for the enhanced NO₂ gas sensing on MEMS sensor device. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2024. P. 134891. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134891>
29. Owais T., et al. Graphene-Based MEMS Devices for Gas Sensing Applications: A Review. *Micro and Nanostructures.* 2024. P. 207954. <https://doi.org/10.1016/j.micrna.2024.207954>
30. Huang C. W., et al. A room temperature ZnO: Ga NWs&NSs/MEMS H₂S gas sensor. *Materials Science in Semiconductor Processing.* 2025. P. 109149. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.109149>
31. Bai S., et al. On the construction of hollow nanofibers of ZnO-SnO₂ heterojunctions to enhance the NO₂ sensing properties. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2018. Pp. 692-702. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.055>
32. Singh G., et al. ZnO decorated luminescent graphene as a potential gas sensor at room temperature. *Carbon.* 2012. Pp. 385-394. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.08.050>
33. Franke M. E., Koplin T. J., Simon U. Metal and metal oxide nanoparticles in chemiresistors: does the nanoscale matter?. *small.* 2006. Pp. 36-50. <https://doi.org/10.1002/smll.200500261>
34. Spanhel L., Anderson M. A. Semiconductor clusters in the sol-gel process: quantized aggregation, gelation, and crystal growth in concentrated zinc oxide colloids. *Journal of the American Chemical Society.* 1991. Pp. 2826-2833. <https://doi.org/10.1021/ja00008a004>
35. Huang H., et al. Sulfuration-desulfuration reaction sensing effect of intrinsic ZnO nanowires for high-performance H₂S detection. *Journal of Materials Chemistry A.* 2015. Pp. 6330-6339. <https://doi.org/10.1039/C4TA05963H>
36. Xuan J., et al. Room-temperature gas sensor based on in situ grown, etched and W-doped ZnO nanotubes functionalized with Pt nanoparticles for the detection of low-concentration H₂S. *Journal of Alloys and Compounds.* 2022. P. 166158. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166158>
37. Lupan O., et al. Nanostructured zinc oxide gas sensors by successive ionic layer adsorption and reaction method and rapid photothermal processing. *Thin Solid Films.* 2008. Pp. 3338-3345. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.10.104>
38. Kamble V. S., et al. Enhanced NO₂ gas sensing performance of Ni-doped ZnO nanostructures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* 2021. Pp. 2219-2233. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04987-z>
39. Goma M. M., et al. Gas sensing performance of sprayed NiO thin films toward NO₂ gas. *Journal of Alloys and Compounds.* 2021. P. 160908. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160908>
40. Maricar S. M. M., et al. Fiber optic gas sensor response of hydrothermally synthesized nanocrystalline bismuth tungstate to methanol. *Materials Letters.* 2021. P. 129337. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129337>
41. Shanavas S., et al. A facile microwave route for fabrication of NiO/rGO hybrid sensor with efficient CO₂ and acetone gas sensing performance using clad modified fiber optic method. *Optik.* 2021. P. 165970. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165970>
42. Kavinkumar T., et al. Effect of functional groups on dielectric, optical gas sensing properties of graphene oxide and reduced graphene oxide at room temperature. *Rsc Advances.* 2015. Pp. 10816-10825. <https://doi.org/10.1039/C4RA12766H>
43. Vadivel S., Balaji G., Rathinavel S. High performance ethanol and acetone gas sensor based nanocrystalline MnCo₂O₄ using clad-modified fiber optic gas sensor. *Optical Materials.* 2018. Pp. 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.08.067>
44. Wang X., Zhang J., Zhu Z. Ammonia sensing characteristics of ZnO nanowires studied by quartz crystal microbalance. *Applied Surface Science.* 2006. Pp. 2404-2411. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.04.047>

45. Wu Z., et al. Enhanced sensitivity of ammonia sensor using graphene/polyaniline nanocomposite. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2013. Pp. 485-493. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.01.014>

46. Van Quy N., et al. Gas sensing properties at room temperature of a quartz crystal microbalance coated with ZnO nanorods. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011. Pp. 188-193. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.10.030>

47. Bayram A., et al. CO gas sorption properties of ferrocene branched chitosan derivatives. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017. Pp. 308-313. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.08.175>

Hrebonkin Ye.O., Zavorotnyi V.F. THE USE OF NANOMATERIALS IN GAS MEMS SENSORS

Gas sensors are essential elements for monitoring of air quality, controlling industrial emissions, and ensuring safety in many areas. Recent advances in microelectromechanical systems (MEMS) make it possible to create sensors with compact dimensions, low power consumption, and high sensitivity. However, traditional materials, such as metal oxides, have low selectivity, slow response, and limited lifetime. The use of nanomaterials, including carbon nanotubes, metal nanoparticles, graphene, and semiconductor nanowires, opens up new perspectives in the development of MEMS sensors to improve their sensitivity, selectivity, and stability. The paper analyzes the principles of operation of various types of MEMS sensors, such as resistive, optical, acoustic, and thermal, with an emphasis on their advantages and limitations. Examples of sensor improvement by modification with nanomaterials, including the use of metal oxides, hybrid structures, graphene, and nanowires, are considered. Particular attention is paid to the mechanisms of interaction of gases with sensitive layers based on nanomaterials. The advantages of ZnO/TeO₂ heterostructures in NO₂ sensors, ZnO modification with graphene in CO sensors, and the use of ZnO:GaNWs/MEMS in H₂S sensors are analyzed. The paper presents the results of a comparative analysis of the performance characteristics of MEMS sensors of different types, including sensitivity, response time, selectivity, and operating temperatures. It is shown that nanomaterials allow the development of more efficient sensor systems due to their unique physicochemical properties, such as high surface area, electrical conductivity, and stability. It is concluded that the integration of nanomaterials into sensor systems is promising for solving modern problems of gas analysis, in particular, real-time monitoring of toxic gases. Further research is aimed at optimizing the technologies for the synthesis and integration of nanomaterials into MEMS structures to create a new generation of sensors that combine high efficiency with affordability and durability.

Key words: MEMS, gas sensors, nanomaterials, nanotechnology.

Зимовченко В.О.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

П'ЯТЕ ПОКОЛІННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ (5G). ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ. ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ

Уявити сучасне життя без інтернету вже неможливо. Смартфони та інша портативна електроніка стали частиною нашого життя. Розвиток і впровадження нових технологій змінили його назавжди. Замість паперової книги ми читаємо електронну, а щоб дізнатись останні новини ми відкриваємо сторінки соціальних мереж замість звичних друкованих газет. Дивитись фільми та слухати музику можна будь де, чи то по дорозі на роботу, в кафе або навіть відпочиваючи на природі. Сплачувати за рахунками не виходячи з кімнати власного будинку. Таке поняття як «розумний дім» стало звичним майже кожному. Але все це було б неможливо без мобільного інтернету. Весь той потік інформації надходить завдяки технології мобільного зв'язку зародженого ще в 80-і роки 20-го століття. Від примітивного голосового повідомлення тоді, і до керування «розумним будинком» чи автопілотом електромобілю сьогодні. Стрімке зростання і поява нових технологій змінять наше життя вже найближчими роками, і мобільний зв'язок п'ятого покоління (5G) відіграє в ньому ключове значення.

У статті аналізується розвиток мобільного зв'язку до 5G та його основні характеристики у порівнянні з попередніми поколіннями. Описані переваги 5G, включно з вищими швидкостями передачі даних, зниженими затримками та більшою кількістю пристроїв, підключених до мережі. Проаналізовано сучасний стан впровадження 5G в Україні та світі, окреслено основні проблеми і перспективи розвитку цієї технології.

Мобільний зв'язок розвивався протягом кількох десятиліть, постійно покращуючи швидкість передачі даних, покриття та можливості підключення. 5G є найбільш сучасною технологією мобільного зв'язку, яка надає суттєві покращення порівняно з попередніми стандартами. Вона має потенціал для трансформації багатьох галузей економіки, від транспорту та охорони здоров'я до інтернету речей (IoT) та розваг.

П'яте покоління мобільного зв'язку знаменує нову еру технологічних можливостей, які розширюють горизонти того, як ми спілкуємось, працюємо та користуємося даними. Це покоління перевершує всі попередні стандарти мобільного зв'язку за швидкістю, надійністю і здатністю об'єднувати величезну кількість пристроїв в одному просторі.

Ключові слова: мобільний зв'язок, 5G, впровадження, частота, передача даних.

Постановка проблеми. Мережі першого покоління (1G) з'явилися в 1980-ті роки, і з того часу постійно розвивались та вдосконалювались. Друге (2G) дало змогу відправляти з мобільного телефону текстові повідомлення, а третє (3G) провадити відеоконференції та спілкування у соціальних мережах. Четверте (4G) покоління принесло високошвидкісний інтернет, перегляд відео у високій роздільній здатності та онлайн геймінг.

В даній статті проводиться аналіз майбутнього, п'ятого (5G) покоління мобільного зв'язку. Як він має переваги в порівнянні з попереднім поколінням. Як світ поступово переходить на 5G, та коли українці зможуть спробувати та скористатися його перевагами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням в області проблематики мобільного зв'язку п'ятого покоління займалися такі вітчиз-

няні спеціалісти як телеком-експерт Роман Хіміч [1, 2], генеральний директор УДЦР Володимир Корсун [3] та менеджер програм, експерт з телекомунікацій в *Luxoft* Руслан Рамазанов [4] та інші.

Постановка завдання. Метою даної статті є комплексно розкрити тему 5G технології, охопивши як технічні аспекти, так і соціально-економічні наслідки. Проаналізувати переваги, недоліків та як різні країни світу впроваджують 5G у себе та які результати вони отримують. Поточний стан розвитку 5G в Україні, перспективи та виклики. Порівняти його з попередніми поколіннями, показати переваги нового стандарту, та які можливості він відкриває. Проаналізувати як впровадження 5G може змінити такі галузі як транспорт, промисловість, медицина, тощо. Визначити основні тренди розвитку нової технології та спрогнозувати її майбутнє в Україні.

Виклад основного матеріалу. *Історична довідка. Початок становлення та розвиток мобільного зв'язку.* Початок запуску першого покоління (1G) мобільного зв'язку можна вважати 1980-ті роки 20 століття. Буква «G» означає покоління (*generation*). Технологія використовувала аналогову модуляцію радіосигналів, а її основною функцією був голосовий зв'язок. Перше покоління було не ідеальне, інколи зв'язок обривався через перешкоди, а інших додаткових сервісів технологія не мала.

У 1990-х з'являється друге покоління (2G). Практичне застосування технології почалося в 1993 році. В Європі вона отримала назву *GSM 900/1800 (Global System for Mobile Communications)*. Частотний діапазон був в межах між 900 та 1800 МГц. Сигнал став чіткішим, з'явилась можливість надсилати текстові (SMS) та мультимедійні (MMS) повідомлення. Люди почали більш активніше користуватись новими можливостями ніж голосовими дзвінками. Технологія другого покоління дозволяла користуватись інтернетом на основі *GPRS* та *EDGE*. Швидкість була скромною, не більше 100 Кбіт/с, але навіть вона була фантастичним досягненням на той час.

Третє покоління (3G) з'являється на початку 2000-х років. Телефони того часу вже могли відтворювати відео, відкривати повноцінно вебсторінки та здійснювати відеодзвінки. Завдяки швидкості у майже 2 Мбіт/с мобільний телефон стає вікном у світ соціальних мереж та месенджерів. Ми почали жити у світі, де мобільний телефон став невід'ємною частиною нашого життя. Частотний діапазон зріс до 2000 МГц. На сьогодні існує два стандарти 3G: *UMTS (W-CDMA)* та *CDMA2000*.

Якщо третє покоління відкрило вікно в світ інтернет технологій, то четверте (4G) стало справжньою революцією. Завдяки переходу на більш високі частоти (від 2000 і до 6000 МГц) швидкість передачі даних стала досягати до 1 Гбіт/с. На практиці реальна швидкість сягає близько 100 Мбіт/с, що дає можливість дивитись відео високої роздільної здатності в реальному часі, брати участь у відеоконференціях, дивитись фільми в 4K та грати в онлайн ігри без будь-яких обмежень. Все що раніше було можливим тільки на комп'ютері, тепер можна було реалізувати на смартфоні завдяки 4G. В Україні четверте покоління використовує технологію *LTE (Long-Term Evolution)*, та працює на частотах у 1800 МГц, 2000 МГц та 2600 МГц.

Як працює 5G. Перспективи розвитку у світі та Україні. П'яте покоління (5G) вражає не тільки швидкістю інтернету у 10 Гбіт/с, але і можливістю майже без затримки передавати дані. Це дає можливість впровадження автономного безпілотного автотранспорту, або проведення складної операції за допомогою роботизованої руки хірур-

гом, що знаходиться в тисячах кілометрів. Все це завдяки малій затримці між передачею даних. Якщо в четвертому поколінні вона становить від 50 мілісекунд (мс), то в п'ятому – до 5 мс. Також це підтримка одночасно великої кількості пристроїв до однієї базової станції (вежі). Цей показник може досягати до 1 млн. пристроїв в 5G, тоді як у мережах 4G лише до 400 тис. одночасно підключених пристроїв. В 3G цей показник ще менший, не більше 100 тис. Підсумовуючи, можна дійти висновку, що з кожним роком з'являється все більше пристроїв, як потребують одночасного підключення до мережі в режимі реального часу.

Основною складністю розгортання технології 5G є проблема у базовій інфраструктурі, тобто в недостатній кількості веж мобільного зв'язку. 2G працював на частотах в 900 МГц та 1800 МГц. Чим нижча частота, тим більший радіус охоплення. Для другого покоління вежі ставили на відстані від 15 і до 30 кілометрів одна від одної. 3G може працювати на частоті в 900 МГц, але все ж таки основною його частотою є 2100 МГц. Це означає, що відстань між вежами зменшилась на 5–6 кілометрів. В місті з щільною забудовою ця відстань ще менша. Для 4G використовується частота від 1800 МГц і до 2600 МГц. Чим вища частота, тим швидша передача даних за секунду. Щоб отримати швидкість передачі даних в межах від 100 Мбіт/с, вежі потрібно ставити кожні 400–600 метрів.

Для роботи 5G використовується дві частоти смуг, у спектрі яких працює новий стандарт, *FR1 (900–6000 МГц)* та *FR2 (24–100 ГГц)*. Щоб забезпечити високу швидкість передачі даних, вежі мають розміщуватись одна від одної не більше ніж на 200–400 метрів. Це завдання не одного дня, та навіть року, тому для пришвидшення переходу від одного стандарту до іншого, такі вежі, як правило встановлюють заздалегідь.

Більшості на сьогодні цілком достатньо і 4G (*LTE*), тому виникає питання, чи потрібно витрачати мільйони на впровадження технології яка буде потрібна лише невеликій кількості вибагливих користувачів. Справа в тому, що новий стандарт зв'язку розроблений з використанням більш сучасних технологій, враховуючи ефективніші методи кодування та захисту сигналу. Доцільно буде порівняти четверте та п'яте покоління більш детально.

1. *Збільшення пропускної здатності.* Це дозволить обслуговувати велику кількість пристроїв одночасно. П'яте покоління адаптується до потреб користувача, дозволяючи мережі виділяти ресурси за необхідністю, для забезпечення оптимального споживання.

2. *Час реагування та мінімізація затримок.* Особливістю технології п'ятого покоління є зменшення латентності. Латентність (*latency* – затримка) – часовий інтервал між від-

правкою і отриманням даних. В четвертому поколінні вона становить від 50–200 мс. В 5G ця затримка лише до 5 мс. Мінімізація затримки дозволяє реалізувати додатки та сервіси в реальному часі.

3. *Різниця в частотах.* 4G працює на частотах нижче 2000 МГц, в той час, як 5G – в діапазоні частот від 3000 МГц і до 300 ГГц. Завдяки високій частоті збільшується швидкість передачі даних по мережі та її місткість. Вежі 4G посилюють сигнал у всі напрямки, в той час, як 5G – передає дані на коротких хвилях, що забезпечує більш точне регулювання напрямку передачі.

4. *Швидкість передачі даних.* Пікові значення швидкості при передачі інформації для технології 5G приблизно у 20 разів більші ніж у 4G на сьогодні. Максимальне значення швидкості для 5G – 20 Гбіт/с, а для 4G – 1 Гбіт/с. Варто зазначити, що це лабораторні показники, і в реальності швидкість буде значно меншою.

Друге питання, де конкретно буде застосовуватись новий стандарт? В яких галузях промисловості, окрім портативної електроніки його можна інтегрувати вже сьогодні.

Медицина. Одна з небагатьох галузей індустрії, де 5G вже дає свої результати. Жителі маленьких міст, маючи високошвидкісний інтернет можуть отримати онлайн-консультацію лікаря не виходячи з дому. Це підвищить відсоток людей, які з тих чи інших причин не змогли вчасно потрапити до фахового спеціаліста. Особливо це мало великий попит в часи пандемії COVID-19, коли всі сиділи на карантині і не мали можливості потрапити до лікарні.

Автомобільна галузь. Автомобіль з автопілотом вже не є чимось фантастичним. Для запуску ще більшої кількості автомобілів з автопілотом потрібно реалізувати миттєву комунікацію між автомобілями з мінімальною затримкою, щоб уникнути аварій і перевантаження доріг. Наднизька затримка в мережах п'ятого покоління дозволить у реальному часі відстежувати ситуацію на дорозі з поганою видимістю. А якщо додати сюди технологію доповненої реальності (AR, *Augmented Reality*) це дасть можливість побачити об'єкти, які не видимі людському оку, але видно датчикам і сенсорам, встановленим в автомобілях.

Не слід забувати і про навігацію, яка повинна бути точною і містити оновлені дані про ситуацію на дорогах. 5G разом зі штучним інтелектом та інтернетом речей дозволить тримати баланс завантаженості доріг і регулювати роботу світлофорів у реальному часі. Це в свою чергу впливає на пропускну спроможність мережі та на кількість даних які будуть одночасно передаватися між усіма учасниками дорожнього руху, включаючи інфраструктурні об'єкти. Автопілот також допоможе і в медичній сфері. Люди які мають

вади зі здоров'ям і самі не можуть водити авто, тепер будуть мати можливість доїхати до лікарні чи медзакладу вчасно і безпечно.

Промисловість. Використання роботизованої техніки дозволить ще більше автоматизувати процес, і як наслідок зменшити витрати за рахунок скорочення людської сили, а також зменшити відсоток помилок на виробництві.

Сільське господарство. З'явиться можливість більш стабільно і точніше керувати автоматизованою сільгосптехнікою, відстежувати в реальному часі стан полів і за потреби вносити зміни в їх роботу.

Сфера IT та розваг. З кожним роком технології AR та VR набувають все більшої популярності, за рахунок більшого вибору гарнітур, та зменшення їх вартості. Майже кожний виробник портативної електроніки має в своєму арсеналі окуляри віртуальної реальності (VR, *Virtual Reality*). І якщо кілька років тому, для перегляду фільму або гри потрібно було їх підключати до ПК за допомогою дротів, то на сьогодні це повністю автономний пристрій, який працює завдяки підключенню по Wi-Fi. Завдяки окулярам VR можна пізнавати історію, побувати на вершині Евересту, або пірнути в Маріанський жолоб. Майбутні лікарі можуть більш детально вивчати будову людського тіла, а вчені та історики зазирнути у минуле на тисячі років назад. Така інтерактивність потребує не тільки потужної апаратної частини самих окуляр, але і з мінімальною затримкою та в високій роздільній здатності передавати зображення з серверів прямо в очі користувачу. 5G допоможе реалізувати ці, та ще багато інших проектів в майбутньому. Сфера застосування AR та VR дуже широка.

В березні 2021 року компанія Samsung встановила новий рекорд при завантаженні Full-HD фільму вагою 4 гігабайти у мережі 5G на телефон Samsung Galaxy S20 за 6 секунд.

Впровадження технології 5G у світі. За інформацією експертів з RSA, станом на 4 квартал 2020 року 5G покриття доступне в 47 країнах завдяки 107 операторам. RSA – це угода про регіональний спектр в регіоні східного партнерства. На Європейському континенті, технологія нового стандарту вже доступна в таких країнах як Австрія, Бельгія, Болгарія, Чехія, Данія, Фінляндія, Німеччина, Угорщина, Ірландія, Італія, Латвія, Нідерланди, Польща, Румунія, Словенія, Іспанія, Швеція, Норвегія, Велика Британія та Швейцарія. У світі 5G активно впроваджують Південна Корея, Сполучені Штати Америки, Китай, Саудівська Аравія, Канада, Домініканська Республіка, Японія, Австралія, Індія.

Лідерами з інтеграції мереж п'ятого покоління є США та Південна Корея. У цих країнах вже побудовано мережі, які забезпечують доступ до 5G у великих містах. Сеул став першою країною

який запустив 5G в комерційних цілях, а вперше його застосував на відкритті Зимових Олімпійських Ігор 2018 року.

Європейські країни, такі як Німеччина, Велика Британія та Італія, активно працюють над впровадженням 5G. У 2018 році тестову мережу 5G було запуснено в Гамбурзі оператором *Deutsche Telekom*. Частота роботи мобільного зв'язку дорівнює 3700 МГц, а сама вона працює на обладнанні *Huawei*. В 2019 році мережу було запуснено в Берліні та Боні. В Італії послуги з надання мобільного зв'язку 5G надає *Vodafone-Italia*. Мережа доступна у п'яти великих містах: Мілані, Турині, Болоньї, Римі та Неаполі. Компанія *Vodafone* у 2023 році першою запустила автономну мережу 5G Ultra у Великій Британії. Послуга доступна в таких містах як Лондон, Манчестер, Глазго та Кардіфф. Церемонія коронації короля Чарльза III та Камілі 6 травня 2023 року трансливалася на території Великої Британії через публічну автономну мобільну мережу п'ятого покоління 5G (5GSA).

В 2019 році в Китаї вперше було проведено операцію за допомогою 5G. Операція проводилась в Пекінській клініці і тривала близько чотирьох годин. Відстань на якій проводилась операція – 136 км. В червні 2023 року в південній провінції Хайнань, дистанційно було проведено мікронну операцію на оці. Проводили її фахівці на базі офтальмологічного центру Чжуншань національного дослідницького Університету Сунь Ятсена, що розташований в 600 км від Хайнань. Очна хірургія вимагає від офтальмологів високого рівня точності та стійкості. Таку надскладну операцію вдалося виконати завдяки технології 5G та робота-хірурга. Операція пройшла успішно, зір пацієнту було відновлено. В липні 2024 року також була проведена ще одна операція на відстані з видалення ракової пухлини з легень пацієнтки. Хірург перебував у себе в кабінеті у Шанхаї на відстані в 5 тисяч кілометрів, в той час, як пацієнтка була в іншій частині країни – Кашгарі. Операцію вдалося провести завдяки технології 5G, подолавши бар'єр у передачі даних та з мінімальною затримкою.

Китайські компанії *Huawei* та *ZTE* є головними гравцями на ринку 5G. В планах Пекіну, розширити покриття на більшість великих міст до кінця 2025 року.

Впровадження технології 5G в Україні. Повномасштабна війна Росії проти України суттєво уповільнила розвиток інфраструктури, у тому числі й телекомунікаційної. Розгортання мереж 5G вимагає значних інвестицій від операторів зв'язку, які на жаль в умовах війни та економічної кризи є недоцільними. Також потрібно удосконалити законодавчу базу, що регулює діяльність у сфері телекомунікацій, щоб забезпечити сприят-

ливі умови для розвитку мереж п'ятого покоління. Нажаль покриття 4G в Україні ще не є повним, особливо в сільській місцевості. Тому розгортання 5G потребує ще більше додаткових інвестицій у розвиток базових станцій. Не потрібно забувати також і про енергетичну кризу викликану війною. Це створює додаткові перешкоди для роботи мереж 5G, оскільки вони потребують більше енергії, ніж мережі попередніх поколінь.

Проте, не зважаючи на всі перешкоди та випробування спричинені війною, в Україні вже реалізовано декілька пілотних проектів з тестування технології 5G. Це дозволить оцінити потенціал та визначити технічні характеристики. З 9 вересня і по 7 грудня 2024 року у Львові на вул. Личаківській, 72 буде проводитись випробування технології 5G, у смузі радіочастот 3450–3500 МГц. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій (НКЕК) ухвалила рішення №465, яким дозволила мобільному оператору – *lifecell* провести випробування технології 5G у Львові на вже згаданій вулиці (з базовою станцією *Huawei*). Раніше *Vodafone* та *Nokia* зробили тестову 5G зону на території Івано-Франківського інноваційного центру «Промприлад». У травні 2024 року компанії провели телеміст між Івано-Франківськом, Києвом та Гельсінкі за допомогою 5G.

Якщо говорити про перспективи розвитку саме в Україні, то до закінчення бойових дій повноцінного розгортання по всій території нашої держави не буде. Мережі п'ятого покоління вже зараз можна використовувати в сфері освіти для проведення онлайн конференцій, уроків та практик в містах і селах де є проблеми з мобільним зв'язком. Це особливо критично, де війною було зруйновано багато навчальних закладів та центрів освіти. Онлайн медицина також знайде застосування в Україні. Через війну багатьом людям не потрібно буде їхати через пів країни задля консультації з потрібним фахівцем. Новий стандарт мобільного зв'язку дозволить лікарям надавати допомогу навіть у найскладніших умовах та підвищить доступність якісної медичної допомоги для пацієнтів у віддалених регіонах. Особливо коли це стосується дітей чи людей похилого віку. А в такому великому місті як Київ, де завжди є проблеми з завантаженістю доріг, технологію 5G може бути застосована для балансування та розвантаження доріг, регулюванню дорожнього руху, та впровадження більшої кількості камер контролю швидкості.

Висновки. Технологія 5G – це еволюція мобільного зв'язку, що відкриває нові горизонти у технологічному розвитку. Порівняно з попереднім поколінням, 5G надає значно більші можливості, від промислової революції і до сектору розваг. Незважаючи на всі переваги, повноцінного національного покриття 5G досі немає у більшості

розвинених країн. Китай є лідер з впровадження нової технології. На сьогодні там встановлено понад 2.3 мільйона станцій, з абонентською базою у понад 1 мільярд абонентів. Сполучені Штати Америки в 2023 році мали показник у понад 100 мільйонів абонентів, а у країнах Європи цей показник перевищує 80 мільйонів.

Збільшення пропускної здатності та мінімізація затримок відіграють ключову роль у порівнянні 4G та 5G. На відміну від минулого покоління, новий стандарт розширює можливості вже існую-

чих технологій та відкриває нові можливості для покращення та спрощення нашого життя.

Основними причинами які завадили швидшому переходу на новий стандарт можна назвати пандемію COVID-19, глобальні конфлікти, як війна в Україні, інфляція, погане покриття мережі через відсутність потрібної інфраструктури.

Розгортання в Україні є складним процесом, який потребує великих інвестицій та зусиль. Проте, потенційні переваги від її впровадження роблять її вкрай важливою для розвитку країни.

Список літератури:

1. Роман Хіміч «Шостий гігагерц для 5G чи WiFi: світ розділився на два табори»: сайт URL: <https://mind.ua/openmind/20234510-5g-po-ukrayinski-yak-vplivae-geopolitika-na-rozvitok-merezhi-pyatogo-pokolinnya>
2. Роман Хіміч «5G по-українськи: як впливає геополітика на розвиток мережі п'ятого покоління»: сайт URL: <https://mind.ua/openmind/20234510-5g-po-ukrayinski-yak-vplivae-geopolitika-na-rozvitok-merezhi-pyatogo-pokolinnya>
3. Володимир Корсун «Розвінчуємо міфи про «страшилки» 5G: спойлер – технологія безпечна»: сайт URL: <https://mind.ua/openmind/20210984-rozvinchuemo-mifi-pro-strashilki-5g-spojler-tehnologiya-bezpechna>
4. Руслан Рамазанов «Ласкаво просимо у 5G: навщо переходити на нову технологію»: сайт URL: <https://mind.ua/openmind/20203748-laskavo-prosimo-u-5g-navishcho-perehoditi-na-novu-tehnologiyu>
5. Олег Павлюк «Що таке 5G, як він узагалі працює, і чому люди палять вишки? Відповідаємо на запитання»: сайт URL: <https://hromadske.ua/posts/sho-take-5g-yak-vin-uzagali-pracyuye-i-chomu-lyudi-palyat-vishki-vidpovidayemo-na-zapitannya>

Zymovchenko V.O. FIFTH GENERATION OF MOBILE COMMUNICATION (5G). ADVANTAGES AND DISADVANTAGES. IMPLEMENTATION IN UKRAINE AND THE WORLD

It is now impossible to imagine modern life without the internet. Smartphones and other portable electronics have become an integral part of our daily routine. The development and implementation of new technologies have changed our lives forever. Instead of reading a paper book, we now read an electronic one; to get the latest news, we visit social media pages instead of traditional printed newspapers. We can watch movies and listen to music anywhere-on the way to work, in a café, or even while relaxing outdoors. Paying bills can be done without leaving the comfort of our homes. The concept of a "smart home" is now familiar to almost everyone. However, none of this would be possible without mobile internet. All this flow of information is delivered thanks to mobile communication technology, which originated in the 1980s. From primitive voice messages back then, to controlling a "smart home" or an electric vehicle's autopilot today, rapid advancements in technology will continue to change our lives in the coming years. The fifth generation of mobile communication (5G) will play a key role in this transformation.

This article analyzes the development of mobile communication up to 5G and its main characteristics in comparison with previous generations. The advantages of 5G are described, including higher data transmission speeds, reduced latency, and massive device connectivity. The current state of 5G implementation in Ukraine and the world is analyzed, outlining the main challenges and prospects for the development of this technology.

Mobile communication has evolved over several decades, continuously improving data transmission speeds, coverage, and connectivity capabilities. 5G is the most advanced mobile communication technology, offering significant improvements over previous standards. It has the potential to transform many sectors of the economy, from transportation and healthcare to the Internet of Things (IoT) and entertainment.

The fifth generation of mobile communication marks a new era of technological capabilities, expanding the horizons of how we communicate, work, and use data. This generation surpasses all previous mobile communication standards in terms of speed, reliability, and the ability to connect a vast number of devices within a single space.

Key words: mobile communication, 5G, implementation, frequency, data transmission.

Лук'янюк С.В.

Український науково-дослідного інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ІНТЕГРАЦІЯ ПРИНЦИПІВ ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА СКЛАДАННЯ І КОНЦЕПЦІЇ РЕІНЖІНІРИНГУ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

Стаття присвячена дослідженню інтеграції методологій реінжинірингу та проектування, орієнтованого на виробництво і складання (DFMA), у контексті сучасних умов промислового розвитку, обумовлених динамічними змінами у вподобаннях споживачів та способі життя. У статті розкрито значення реінжинірингу, як невід'ємної складової циклу розробки продукції, що дозволяє не лише деконструювати існуючі вироби, але й аналізувати їхню структуру та функціональність для створення економічно ефективних та функціонально вдосконалених альтернатив. Розкрито важливість застосування підходів проектування, орієнтованих на виробництво та складання (DFMA) для оптимізації процесів розробки, зменшення витрат та підвищення якості продукції на початкових етапах її створення. З'ясовано, що використання DFMA забезпечує комплексне врахування аспектів виробництва та складання, що дозволяє значно зменшити складність виготовлення виробів без втрати їх функціональних характеристик. Ітеративне вдосконалення існуючих дизайнів, модернізація матеріалів, реструктуризація компонентів та модифікація конфігурацій сприяють досягненню таких результатів. Визначено, що такі підходи сприяють не лише оптимізації витрат, але й підвищенню надійності та довговічності продукції, що є ключовими факторами у збереженні конкурентоспроможності на ринку. У роботі проаналізовано ключові аспекти реінжинірингу, які включають аналіз морфологічної структури виробничих процесів для ідентифікації зон вдосконалення. Основний акцент зроблено на оптимізації топології складальних одиниць, що зменшує обсяги операцій складання та підвищує загальну ефективність. Важливим досягненням, висвітленим у статті, є розробка параметричних моделей, орієнтованих на покращення технологічності виробів на ранніх етапах їх життєвого циклу. Окреслено перспективні напрямки інтеграції DFMA у процеси реінжинірингу з врахуванням останніх наукових розробок. Також розглянуто нові підходи до реконструктивного проектування, які поєднують DFMA-технології з сучасними інженерними методами для забезпечення економічної ефективності, підвищення технологічності та функціональності продукції. Такий підхід дозволяє створювати конкурентоспроможні вироби, що відповідають сучасним ринковим вимогам та забезпечують довготривалу надійність.

Ключові слова: проектування виробництва та складання, проектування з урахуванням вартості, проектування продукту, технологічність, реінжиніринг.

Постановка проблеми. Реінжиніринг (reengineering) в контексті сучасної виробничої парадигми представляє систематичний процес аналізу та перепроєктування існуючих процесів з метою досягнення радикальних покращень у ключових показниках ефективності, таких як вартість, якість, обслуговування та темпи. Метою реінжинірингу є оптимізація виробничих та організаційних процесів шляхом їх фундаментального перепроєктування та застосування сучасних інформаційних технологій. До ключових етапів реінжинірингу можна віднести: визначення цілей та критеріїв ефективності процесів, документування та аналіз існуючих процесів, виявлення «больових точок» та вузьких місць, розробку нової концепції виробничих процесів з викорис-

танням сучасних методів, впровадження нових виробничих процесів із застосуванням інформаційних технологій, постійний моніторинг та вдосконалення впроваджених виробничих процесів.

Реінжиніринг вимагає комплексного підходу, залучення крос-функціональних команд та радикальної перебудови виробничих процесів [1]. Він дозволяє досягти значного підвищення ефективності, скорочення тривалості циклів, зменшення витрат та покращення якості продукції чи послуг.

Ключовим етапом реінжинірингу є збір даних за допомогою таких методів, як:

– інвентаризація – проведення детального обстеження об'єкта реінжинірингу для ідентифікації всіх його складових, функцій та взаємозв'язків;

– спостереження – безпосереднє спостереження за роботою об'єкта з метою фіксації його поведінки, ритмів, проблемних моментів тощо;

– опитування – збір інформації від персоналу, що взаємодіє з об'єктом реінжинірингу, з метою отримання суб'єктивної оцінки його недоліків та потенціалу;

– аналіз документації – вивчення проектної, технічної та іншої документації, що регламентує функціонування об'єкта реінжинірингу;

– моделювання – створення імітаційних моделей об'єкта реінжинірингу для проведення віртуальних експериментів та аналізу його поведінки.

Комплексне застосування цих методів дозволяє всебічно дослідити об'єкт реінжинірингу, виявити «вузькі місця» та сформувати детальну картину його поточного стану. Отримані дані стають основою для наступних етапів реінжинірингу – аналізу та проектування. Слід зазначити, що реінжиніринг є незамінним інструментом у таких випадках:

– при необхідності реконструкції та модернізації морально та фізично застарілих виробничих потужностей. Застосування методів реінжинірингу дозволяє провести всебічний аналіз існуючих бізнес-процесів, визначити вузькі місця та оптимізувати їх, впровадивши сучасні високоефективні технології;

– у разі потреби кардинальної перебудови організаційної структури підприємства. Реінжиніринг дає змогу переглянути розподіл функцій та повноважень, усунути дублювання робіт, забезпечити гнучкість та адаптивність структури до змін зовнішнього середовища;

– при виході на нові ринки збуту чи впровадженні принципово нових видів продукції. Реінжиніринг дозволяє сформувати оптимальну виробничу інфраструктуру, налагодити ефективну систему постачання, логістики та збуту;

– для підвищення конкурентоспроможності підприємства шляхом суттєвого зниження витрат, скорочення термінів виробничого циклу, покращення якості продукції. Застосування методів реінжинірингу дає змогу докорінно переглянути та перепроектувати бізнес-процеси з урахуванням сучасних вимог ринку.

Відсутність даних щодо виробничого процесу часто створює значні перешкоди для організації виробництва. Проте методологія реінжинірингу для виробництва дозволяє подолати ці труднощі шляхом реконструкції виробничого процесу на основі аналізу готового виробу. Застосовуючи спеціалізовані програмні засоби, інженери ство-

рюють детальну модель, яка описує всі етапи виготовлення деталі або вузла. Крім того, реінжиніринг дозволяє розглядати альтернативні технологічні рішення, що може призвести до зниження собівартості виробництва або поліпшення якості продукції. Такий підхід особливо актуальний для підприємств, які займаються виробництвом складної техніки або працюють з унікальними матеріалами.

Одним з основних елементів реінжинірингу є його інтеграція з принципами проектування для виробництва та складання (DFMA, Design for manufacturing and assembly) [2]. Принцип DFMA пропонує потужний інструментарій для оптимізації виробничих процесів, проте його ефективне застосування в контексті реінжинірингу вимагає додаткових досліджень. Одним з ключових питань є адаптація стратегій DFMA до специфічних особливостей виробництва існуючих продуктів. Необхідно розробити методики, які дозволять швидко і точно оцінити потенціал для впровадження DFMA в конкретному випадку. Крім того, важливою проблемою є масштабування DFMA на рівні підприємства. Для цього необхідно створити систему стандартів і процедур, яка забезпечить послідовне застосування DFMA в різних проектах, а також розробити інструменти для оцінки ефективності впровадження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепція реінжинірингу для виробництва представляє цілеспрямовану методологію реінжинірингу, яка призначена для оптимізації планування технологічного процесу виробництва продукції на основі даних про виробничі процеси та знань у конкретній галузі. Ця методологія спрямована на створення продукції, оптимізованої для виготовлення та складання ще на етапі проектування. Такий комплексний підхід дозволяє суттєво підвищити ефективність виробничих процесів, знизити собівартість продукції та скоротити терміни її виведення на ринок. Помітний внесок у цю сферу зроблено авторами [3], які запровадили багато-процесний виробничий підхід, що інтегрує принципи DFMA. Ця модель надає пріоритет складності виготовлення поряд з попередніми оцінками часу і вартості на етапі проектування, що дозволяє більш обґрунтовано вибирати технологічний процес. На додаток до цього, автори [4] розробили базову структуру, яка допомагає визначити найбільш підходящі виробничі процеси для різних характеристик деталей. Досягнення в цій галузі призвели до появи методів аналізу на основі особливостей, які дозволяють проводити більш доско-

нале моделювання деталей і, відповідно, більш адаптоване планування виробництва. Наприклад, у дослідженні [5] запропоновано фреймворк DFM, який проводить виробничий аналіз, використовуючи технічні та економічні дані. Ця модель оцінює технічну можливість виготовлення деталі, одночасно оцінюючи, чи відповідають виробничі витрати і терміни цілям проекту. Останні інновації також зосереджені на мінімізації виробничих витрат і термінів виконання за рахунок оптимізації дизайну продукту, вибору матеріалів і розподілу ресурсів. Яскравим прикладом є підхід запропонований в [6] до проектування виробництва та складання (DFMA), який полегшує прийняття економічно ефективних рішень на всіх етапах розробки продукту, спрощуючи процеси складання та визначаючи матеріали і робочі процеси. Автори [7] розширили цю концепцію, включивши в неї вибір процесів і матеріалів на основі прогнозування витрат на етапі втілення дизайну. Аналогічно, автори в [8] об'єднали емпіричні, статистичні та фізичні моделі в структурований метод вибору процесу, який вдосконалює виробничі рішення на основі даних. Іншим варіантом рішення є система Cambridge Engineering Selector (CES), розроблена в [9]. Вона надає розширену базу даних, яка класифікує матеріали, процеси та геометрії відповідно до критеріїв технологічності. Використовуючи параметри із задалегідь визначеними діапазонами, ця система пропонує надійну основу для аналізу технологічності, та може надавати рішення на ранніх стадіях проектування. Цей підхід, орієнтований на проектування виробництва та адаптований для підтримки робочого процесу проектування, де виробник повинен вказати детальні технічні параметри для виробництва. Сюди входять такі елементи, як пристосування, технічні характеристики верстатів, типи інструментів і послідовності фрезерування. Для підтримки такої точності в плануванні процесу моделі покладаються на комплексні бази даних, що охоплюють не тільки структуровану систему Ешбі [9], але й додаткові дані з виробничих довідників. На практиці ефективний підхід реінжинірингу вимагає всебічного розуміння виробничих ресурсів, наявних в організації.

Постановка завдання. Стаття присвячена дослідженню інтеграції методологій DFMA в концепцію реінжинірингу виробничих процесів. Метою є детальний аналіз і огляд підходів, що забезпечують оптимізацію проектування продуктів для покращення ефективності виробництва з моменту їх концептуалізації. Методології DFMA

передбачають врахування різноманітних виробничих аспектів і специфікацій продукту, що вимагає ґрунтовного дослідження та адаптації підходів. Важливим аспектом для вдосконалення виробничих процесів є ретельне вивчення існуючих методик та ідеологій, що лежать в основі успішного впровадження DFMA. Такий підхід дозволяє виявити основні проблеми, пов'язані з цією сферою, та віднайти ефективні рішення, спрямовані на підвищення продуктивності у виробництві продукції.

Виклад основного матеріалу. Дослідження інтеграційних механізмів методологій проектування для виробництва та складання (DFMA) в контексті реінжинірингового виробничого менеджменту становить ключовий напрямок оптимізації сучасних виробничих процесів. Згідно з останніми дослідженнями [10], імплементація принципів DFMA на етапі концептуального проектування здатна знизити виробничі витрати на 35–40% та скоротити час виходу продукту на ринок на 25%. Комплексний аналіз методологічного інструментарію DFMA, включаючи DFA-індекс та DFM-метрики, показує на необхідність їх адаптації до специфіки реінжинірингового підходу. Сучасні дослідження в галузі реінжинірингу виробничих процесів підтверджують ефективність інтегрованого застосування методів топологічної оптимізації та параметричного моделювання при створенні технологічних процесів. Критичними факторами успішної інтеграції виступають:

- імплементація предиктивної аналітики для оцінки технологічності;
- застосування методів машинного навчання для оптимізації параметрів складання;
- використання цифрових двійників для верифікації проектних рішень.

Процес розробки продукту все частіше визнається ключовим фактором у визначенні конкурентної переваги виробництва. Це обумовлено підвищеним попитом на часті оновлення продуктових лінійок, контролем за витратами на розробку та найкоротшими термінами розробки продукту для задоволення постійно мінливих потреб ринку. Структурована модель створення продукту (рис. 1) може слугувати основою для впровадження принципів реінженерингу, ставлячи акцент на передбаченні та перекритті початкових етапів.

Скорочуючи час, необхідний для розробки нового продукту, та уможливаючи постійний моніторинг витрат, можливо досягти швидшого та ефективнішого запуску продукту. На рисунку 1

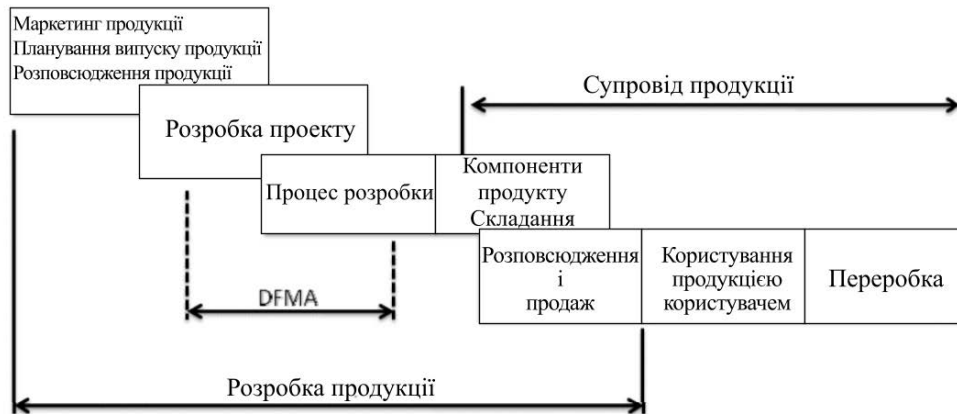


Рис. 1. Еталонна модель процесу виготовлення продукції

також підкреслено застосування методу DFMA, який полегшує розробку продукту шляхом інтеграції виробничих обмежень на ранніх стадіях процесу проектування. DFMA відіграє важливу роль у проектуванні, оскільки заохочує синхронізований робочий процес між відділами, де діяльність кожного відділу – від проектування до виробництва, узгоджується в режимі реального часу. Таким чином, команда розробників отримує вигоду від вкладу членів, що не входять до складу основної команди проектувальників, включаючи представників відділів продажу, маркетингу, закупівель та інженерів. Така міжфункціональна співпраця не лише забезпечує відповідність проекту потребам ринку, але й сприяє формуванню цілісного бачення та є значно гнучкішою у порівнянні з традиційною відомчою замкнутістю. Для малих та середніх виробництв, яким часто бракує ресурсів для значних інвестицій у дослідження та технологічних інновацій, співпраця та вдосконалення стратегії стають життєво важливими для контролю витрат та успішного впровадження інноваційних продуктів. Такі форми виробництва часто стикаються з фінансовими та ресурсними обмеженнями, які обмежують їхню здатність приймати агресивні, капіталомісткі стратегії розвитку. Однак ці проблеми можна пом'якшити, застосувавши підхід реінжинірингу в рамках процесу виготовлення продукції. Реінжиніринг дозволяє розбирати існуючі продукти, вивчати та розуміти деталі конструкції, а також впроваджувати вдосконалення або нові функції у продукцію, що сприяє не лише можливості продукції відповідати поточним вимогам ринку, але й вдосконалити технічні ноу-хау, закладаючи можливість постійного вдосконалення продукції. Слід зазначити, що методологію DFMA часто поділяють на два основні етапи, що систематично спрощу-

ють дизайн продукту та зменшують виробничі витрати [11]. Спочатку основна увага приділяється проектуванню для складання (DFA, Design for Assembly), метою якого є оптимізація структури продукту. Цей процес включає в себе оцінку та оптимізацію розташування і вибору деталей, матеріалів і процесів, щоб забезпечити ефективне складання з меншою кількістю компонентів. Мінімізуючи складність, DFA сприяє як економічному використанню матеріалів, так і скороченню часу складання, що призводить до значної економії коштів. Після досягнення оптимальної конфігурації за допомогою DFA, підхід переходить до проектування для виробництва (DFM, Design for Manufacturing), де розробляються детальні специфікації для окремих компонентів з акцентом на мінімізацію виробничих витрат. На цьому етапі дизайн проходить подальше вдосконалення, щоб гарантувати, що кожен компонент може бути виготовлений ефективно, із застосуванням економічно ефективних процесів і матеріалів, які відповідають виробничим можливостям. Цей етап включає детальний розгляд технологічності, гарантуючи, що кожна деталь розроблена таким чином, щоб використовувати існуючі виробничі технології і мінімізувати потребу в спеціалізованому обладнанні або надмірній кастомізації. Такий підхід – DFMA, підтверджений останніми дослідженнями, підкреслює значну роль ранніх проектних рішень у зниженні витрат і підвищенні ефективності шляхом врахування всього життєвого циклу продукту від початкового проектування до складання і виробництва [12]. Більше того, підхід DFMA за своєю суттю орієнтований на витрати і значною мірою залежить від початкових проектних параметрів виробу. Останні досягнення в галузі реінжинірингу та виробництва, такі як передові обчислювальні методи, ще більше вдосконалю-

ють процес DFMA. Ці інструменти надають можливість оптимізувати дизайн в режимі реального часу, дозволяючи дизайнерам моделювати та оцінювати виробничі обмеження на ранній стадії проектування. Використовуючи дані зворотного зв'язку, інженери можуть ітеративно вдосконалювати конструкцію для досягнення оптимальної технологічності та ефективності збірки. Такий підхід в кінцевому підсумку сприяє більш безперебійному та економічно ефективному виробничому процесу, оскільки усувається розрив між проектними намірами та практичними виробничими міркуваннями.

Процес проектування часто включає поєднання функціонального аналізу і модульного евристичного підходу для всебічного аналізу і розуміння дизайну продукту. Функціональний аналіз зосереджується на визначенні основних експлуатаційних характеристик продукту, оперуючи пов'язаними потоками (енергія, матеріал та сигнал). Цей процес розбиває продукт на окремі складові функції, який полегшує структурований підхід до проектування. Виокремивши ці функції, дизайнери можуть отримати чіткіше уявлення про те, як кожна частина виробу впливає на його загальну роботу, створюючи основу для більш цілеспрямованого та ефективного процесу реінжинірингу. Паралельно з цим, модульний евристичний підхід застосовується для аналізу інтерфейсів та взаємодій між цими функціональними компонентами. Визначаючи вхідні та вихідні потоки для кожної функції, що дозволяє трансформувати дискретні функції продукту в конкретні функціональні модулі. Кожен модуль, по суті, інкапсулює набір пов'язаних функцій, що представляють окремий сегмент загальної роботи продукту. Евристики, що застосовуються до цього процесу модуляризації, дозволяють дизайнерам визначити унікальні властивості та поведінку кожного функціонального модуля, що сприяє глибшому розумінню архітектури продукту. По суті, поєднання аналітичних методів не тільки допомагає візуалізувати структуру продукту, але й дозволяє підвищити ефективність як на етапі виробництва, так і на етапі складання.

Щоб забезпечити детальний аналіз переходу від модулів продукту до потенційних проектних рішень в рамках реінжинірингу, необхідно зазначити роль розуміння властивостей, визначених на кожному етапі генерації модулів. Перехід від високорівневих функціональних модулів до конкретних проектних рішень, таких як компоненти або вузли, вимагає точного узгодження функціо-

нальності кожного модуля з його фізичною реалізацією. У цьому контексті використовуються морфологічна матриця, яка слугує критично важливим інструментом. Систематизуючи потенційні проектні рішення, ця матриця забезпечує структурований засіб для оцінки та узгодження функціональних вимог з фізичними модулями, тим самим підвищуючи чіткість та ефективність процесу концептуального проектування. Метод морфологічної матриці виходить за рамки простого мапування; він дозволяє проектувальникам генерувати широкий спектр альтернативних рішень для кожного функціонального модуля. Такий структурований процес порівняння та вибору гарантує, що кожне фізичне втілення – чи то компонент, чи то вузол – добре відповідає функціональним та експлуатаційним вимогам модуля. Конструктори можуть досліджувати, вдосконалювати і порівнювати різні конфігурації, що призводить до визначення найбільш ефективного проектного рішення для кожної функції. Крім того, матриця полегшує трансформацію концептуальних проектів у практичні вузли, що є важливим для досягнення цілісної та оптимізованої архітектури продукту. У цьому сенсі роль досвіду дизайнерів у поєднанні з регулярною участю постачальників та зацікавлених сторін є надзвичайно важливою у вдосконаленні морфологічної матриці. Оновлені бази даних і добре структуровані записи про попередні проекти, галузеві стандарти та інноваційні практики забезпечують надійну основу для прийняття рішень. Інтеграція інформації з цих джерел у морфологічну матрицю сприяє створенню надійного та інформованого середовища проектування, гарантуючи, що всі рішення відповідають останнім досягненням і оптимізовані як з точки зору технологічності, так і з точки зору збірки. Крім того, вирішальне значення мають надійність і відповідність проектних рішень специфікаціям модулів. Рішення, обрані для кожного модуля, повинні не лише відповідати заданим функціональним властивостям, але й відповідати стандартам надійності, що є важливими для довговічності та продуктивності продукту. Вибір рішень, які підтримують цілісність в реальних умовах, підвищує цінність продукту, особливо коли вони впроваджуються в реінжиніринговий або відновлений продукт, де надійність є ключовим фактором задоволеності клієнтів і довготривалого використання. Як зазначалось методологія DFMA в контексті реінжинірингу базується на оптимізації робочих процесів промислового виробництва на основі багатоцільового підходу.

Завдяки чому забезпечується ретельний баланс між кількома критично важливими факторами, такими як збірка, вибір матеріалів і виробничі процеси, які сприяють економічній ефективності як головній меті. Зосереджуючи багатопільову структуру навколо визначень модулів продукту та класифікації варіантів дизайну, такий процес забезпечує основу для знаходження рішення на етапі концептуального проектування. Цей етап характеризується наявністю лише загальної інформації, а не конкретних деталей щодо геометрії, складу матеріалу, виробничих параметрів або інших конкретних аспектів продукту. Попередні дані, необхідні для такого підходу, включають основні специфікації, такі як:

- орієнтовні максимальні просторові розміри;
- приблизна загальна вага;
- класифікація матеріалу (наприклад, вуглецева сталь, полімери);
- домінуючий виробничий процес (наприклад, механічна обробка, лиття);
- операції складання (наприклад, ручне, автоматизоване, зварювання);
- комерційне або власне позначення (вказує на те, чи є деталі поставленими або виготовленими на замовлення);
- прогнозований обсяг виробництва.

Вихідні дані є основою для аналізу альтернативних проектних рішень, отриманих на попередніх етапах. Для проведення аналізу використовуються приблизні розрахунки вартості та досвід інженерів і дизайнерів, що дозволяє застосувати ключові принципи DFMA – проектування для складання (DFA), проектування для виробництва (DFM) і проектування з урахуванням вартості (DTC) [13]. Завдяки цим принципам покращується процес вибору конфігурації збірки і загальної концепції дизайну, що в свою чергу мінімізує виробничі витрати і складність збірки, одночасно підвищуючи продуктивність. Після переходу до етапу проектування втілення, більш конкретні параметри визначаються на основі обраного концептуального дизайну. На цьому етапі важливими стають налаштування параметрів віртуальних моделей та оптимізація технологічних параметрів – наприклад, точних налаштувань для лиття або механічної обробки. Для створення

віртуальних моделей використовуються такі інструменти, як автоматизоване проектування (САПР) і моделювання методом скінченних елементів, що дозволяють вносити корективи в схему конвеєра і оптимізувати технологічний процес. Надалі, після оптимізацій, детальний дизайн формалізується, створюючи основу для втілення фізичних прототипів перед початком повномасштабного виробництва. На етапі створення прототипів перевіряється відповідність вибору дизайну функціональним, вартісним і виробничим критеріям, що ефективно пов'язує концептуальні дизайнерські рішення з реальною технологічністю та ефективністю збірки. Таким чином, багатопільовий підхід в DFMA підкреслює всебічний баланс між витратами, вибором матеріалів і процесів, можливістю складання і темпами виробництва. Шляхом ітеративної оцінки проектних альтернатив і уточнення параметрів від концептуального до детального проектування забезпечується оптимальне узгодження цілей проектування з практичними вимогами до виробництва і збірки в рамках реінжинірингу.

Висновки. У реінжинірингу фундаментальні принципи і притаманні їм обмеження залишаються незмінними в різних галузях. Хоча конкретні методології можуть суттєво відрізнятися в різних галузях, загальні практики, такі як всебічний збір даних, детальний аналіз, моделювання, створення прототипів, оцінка продуктивності та забезпечення відповідності нормативним вимогам, становлять основу реінжинірингу в будь-якому контексті. Проте такий підхід часто обмежується можливостями сучасного технологічного прогресу, що впливає на його ефективність і застосовність. А реалізація фізичних проектних рішень при проектуванні для виробництва та складання значною мірою залежить від структурованих, обґрунтованих методологій, таких як морфологічна матриця, а також від послідовної взаємодії з галузевими знаннями, інформацією від постачальників та досвідом проектування. Такий підхід гарантує, що кожне обране конструкторське рішення є оптимізованим, надійним і узгодженим як з конкретними функціональними властивостями модуля, так і з ширшими цілями ефективного виробництва.

Список літератури:

1. Крейдич І.М., Івата В.В., Швець К.М. Концептуальні положення реінжинірингу бізнес-процесів на підприємствах, Ефективна економіка, №12, 2015, с. 17–21.
2. Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W. Product Design for Manufacture and Assembly, CRC Press., 2010, p. 712
3. Kerbrat O., Mognol P., Hascoet J. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing, Computers in Industry, 62, 2011, pp.684–692.

4. Sanchez J., Priest J., Soto R. Intelligent reasoning assistant for incorporating manufacturability issues into the design process, *Experts systems with applications*, 12, 1997, pp.81–88.
5. Zhao Z., Shah J. Domain independent shell for DFM and its application to sheet metal forming and injection molding, *Computer-Aided Design*, 2005, pp.881–898.
6. Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W. *Product design for manufacture and assembly*, Marcel Dekker Inc., 1994, p.552.
7. Gupta S., Chen Y. A system for generating process and material selection advice during embodiment design of mechanical components, *J. of Manufacturing System*, 22, 2003, pp.28–45.
8. Shercliff H.R., Lovatt A.M. Selection of manufacturing processes in design and the role of process modeling, *Progress in Material Sciences*, 46, 2001, pp.429–459.
9. Ashby M.F., Brechet Y., Cebon D., Salvo L. Selection strategies for materials and processes, *Materials & Design*, 25, 2004, pp.51–67.
10. Montazeri S., Lei Z., Odo N. Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) in Construction: A Holistic Review of Current Trends and Future Directions. *Buildings*, 2023, 14, pp.285–299.
11. Annamalai K., Najju C.D., Karthik S., Mohan-Prashanth M. Early Cost Estimate of Product During Design Stage Using Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) Principles., *Advanced Materials Research*, 2013, pp.622–623.
12. Durga Prasad K.G., Subbaiah K.W., Rao K.N. Multi-objective optimization approach for cost management during product design at the conceptual phase, *J. Ind. Eng. Int.*, 10(48), 2014, pp.302–341.
13. Hsu C.C., Chen Y. A study on the integration of design for manufacturing and assembly (DFMA) and value engineering (VE) in product development, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(1-4), 2016, pp.1–12.

Lukyanuk S.V. INTEGRATION OF PRODUCTION AND ASSEMBLY DESIGN PRINCIPLES AND CONCESSIONING OF PRODUCTION PROCESS REENGINEERING

The article is devoted to the study of the integration of reengineering and design-for-marketing (DFMA) methodologies in the context of modern industrial development conditions caused by dynamic changes in consumer preferences and lifestyles. The article reveals the importance of reengineering as an integral part of the product development cycle, which allows not only deconstructing existing products but also analyzing their structure and functionality to create cost-effective and functionally improved alternatives. The importance of applying design-for-manufacturing and assembly (DFMA) approaches to optimize development processes, reduce costs and improve product quality at the initial stages of its creation is revealed. It has been found that the use of DFMA provides a comprehensive consideration of the aspects of production and assembly, which can significantly reduce the complexity of manufacturing products without losing their functional characteristics. Iterative improvement of existing designs, modernization of materials, restructuring of components, and modification of configurations contribute to achieving such results. It has been determined that such approaches contribute not only to cost optimization but also to increasing the reliability and durability of products, which are key factors in maintaining market competitiveness. The paper analyzes the key aspects of reengineering, including the analysis of the morphological structure of production processes to identify areas for improvement. The main focus is on optimizing the topology of assembly units, which reduces the volume of assembly operations and increases overall efficiency. An important achievement highlighted in the article is the development of parametric models aimed at improving the manufacturability of products at the early stages of their life cycle. Promising directions for integrating DFMA into reengineering processes are outlined, taking into account the latest scientific developments. The article also considers new approaches to reconstructive design that combine DFMA technologies with modern engineering methods to ensure economic efficiency, increase manufacturability and functionality of products. This approach makes it possible to create competitive products that meet modern market requirements and ensure long-term reliability.

Key words: design for manufacturing and assembly, design to cost, product redesign, manufacturability, reverse engineering.

ПРИЛАДИ

УДК 621.36

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/14>**Скакун О.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ЕКОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ВОДНИХ РЕСУРСІВ У МЕГАПОЛІСАХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ЦЕНТРАХ

Стаття присвячена оглядовому аналізу сучасних засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю та екологічного моніторингу водних ресурсів у мегаполісах та промислових центрах. Дано визначення таких важливих понять, як урбанізація, мегаполіс, екологія, інженерна екологія, екологічний контроль та екологічний моніторинг. Лаконічно розглянуті основні актуальні екологічні проблеми мегаполісів та промислових центрів України. Аргументовано, що для отримання об'єктивної інформації про стан і рівень забруднення різних об'єктів навколишнього середовища у мегаполісах та промислових центрах необхідно експлуатувати надійні засоби екологічного контролю. Наведена класифікація засобів вимірювальної техніки, що застосовуються або можуть бути використані для екологічного контролю. Коротко описані універсальні та спеціалізовані засоби вимірювальної техніки для екологічного контролю, приведений їх порівняльний аналіз. Виконано огляд наукових праць та інших інформаційних масивів щодо засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю в мегаполісах та промислових центрах. Основний матеріал дослідження в запропонованій статті присвячений аналізу портативних сучасних засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю, які виробляються провідними підприємствами в країнах Європейського співтовариства та компаніями розвинутих країн Азії. Проаналізовано особливості сучасних засобів вимірювальної техніки контролю водних ресурсів, що використовуються для побутових потреб. Також у статті наведені марки (типи) та параметри портативних засобів вимірювальної техніки, які рекомендуються використовувати для екологічного контролю.

Ключові слова: урбанізація, мегаполіс, екологія, інженерна екологія, екологічний контроль, екологічний моніторинг, засіб вимірювальної техніки, класифікація засобів вимірювальної техніки для екологічного контролю, методи контролю довкілля, контактні методи контролю, якість води, аналізатор якості води, контроль водних ресурсів, рекомендований комплект портативних засобів вимірювальної техніки.

Постановка проблеми. Стрімкі темпи урбанізації властиві сучасній цивілізації. Урбанізація (від латинського urbanos – міський) означає стрімкі процеси зростання міст і кількості міського населення та посилення їх ролі у всіх сферах життєдіяльності. Внаслідок урбанізації виникло поняття мегаполісу (від грецького mégas – великий і pólis – місто), тобто надзвичайно урбанізована форма міського поселення, що склалася стихійно та обумовлена високою концентрацією населення. Урбанізацію необхідно розглядати у зв'язку з розвитком виробництв, формуванням промислових центрів та створенням транспортної інфраструктури. На жаль, окрім позитиву, наприклад, розвиток важкого машинобудування, електроенергетики, хімічної та будівельної промисловості тощо, урбанізація призводить до

забруднення повітря та джерел водопостачання, токсичних викидів від експлуатації транспортних засобів, шумового та електромагнітного забруднення. Всі ці явища створюють проблеми з екологією. Термін екологія (від грецького oikos – дім, помешкання, місце перебування, logos – наука) вперше запропонував у 1866 р. німецький вчений Е. Геккель [1]. Сучасна екологія – це комплексна наука про будову, функціонування, взаємозв'язки багаторівневих систем у природі й суспільстві з метою збереження людства й біосфери [2]. Це, в свою чергу, призвело до створення інженерної екології – науково-технічного напрямку, що бурхливо розвивається, метою якого є охорона навколишнього середовища як результат контролю, також комплексного й раціонального використання сировинно-енергетичних ресурсів [3].

Контроль за навколишнім середовищем (як первинний екологічний контроль системи екологічного моніторингу) – спостереження за станом і змінами важливих для людини та сукупності живих організмів характеристик: складу та якості повітря, якості води, рівня радіації, шумового та електромагнітного забруднення тощо; порівняння одержаних даних із стандартними граничними параметрами; визначення наявних та потенційних джерел шкідливого впливу на ці характеристики та інформування органів місцевого управління, також адміністрацій більш високого рівня про реальний стан навколишнього середовища [3].

Задачі екологічного контролю у мегаполісах та промислових центрах належать до найактуальніших проблем сьогодення, а після звільнення від російських окупантів українських земель на сході та півдні України, і початку відбудови великих міст та промислових підприємств, вони стануть першочерговими.

Контроль водних ресурсів є одним з важливіших напрямів екологічного контролю.

Рекомендаціям щодо вибору сучасних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) для екологічного контролю і присвячена ця стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальні проблемні питання екологічного контролю у мегаполісах та промислових центрах досліджували такі вітчизняні науковці як В.М. Ісаєнко, К.О. Бабікова, Т.В. Михалевська, Л.В. Береза-Кіндзерська [4], Ю.О. Полукаров, Н.А. Праховнік, О.В. Землянська [5], С.В. Берзіна, В.Є. Борейко, Г.С. Бузан [6], М.М. Орфанова [7] та інші.

Значним та вагомим є також внесок зарубіжних вчених. Це, зокрема, глибокі та ґрунтовні праці Луїзи Т. Моліни, Мішеля Гаусса [8], Філіппа Е. Карпа [9].

Але питання аргументованого обґрунтування та вибору сучасних ЗВТ для екологічного контролю, та переліку рекомендацій щодо їх застосування в працях вищезазначених дослідників майже зовсім не розглянуті.

Наявна значна кількість інших публікацій, які мають інформаційно-довідковий та рекламний характер, або розміщені на електронних ресурсах провідних дистрибуторських та виробничих компаній, що спеціалізуються на розробці, виробництві та (або) постачанні різноманітних ЗВТ [10, 11].

Постановка завдання. Метою статті є – ґрунтовний аналіз технічних параметрів та результатів апробацій доступних в Україні певних моделей ЗВТ, що можуть бути використані для задач екологічного контролю у мегаполісах та промислових

центрах, надання лаконічного опису та рекомендацій щодо вибору та оптимального застосування портативних сучасних ЗВТ для контролю водних ресурсів, що використовуються для побутових та промислових потреб. Розглядаються лише певні технічні питання екологічного контролю, юридичні нюанси потребують окремих досліджень.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що самими ефективними інструментами щодо запобігання у мегаполісах та промислових центрах екологічним аваріям і катастрофам різного рівня є засоби та методи спостереження за станом навколишнього середовища. Для отримання об'єктивної інформації про стан і рівень забруднення різних об'єктів навколишнього середовища необхідно експлуатувати надійні ЗВТ екологічного контролю, які класифікуються по:

- виду досліджуваного середовища (для визначення складу та якості води);
- умовам застосування (стаціонарні, возимі, портативні);
- учбово-виробничому принципу (1-го учбово-професійного рівня, 2-го учбово-професійного рівня, 3-го учбово-професійного рівня);
- методам отримання інформації (хімічний, фізико-хімічний, оптичний, електрохімічний, хроматографічний, фізичний, радіометричний, електромагнітний, масс-спектрометричний, шумометричний) [12].

Екологічний контроль – комплекс заходів, в тому числі моніторингового типу, за станом контролю та нагляду за довкіллям з метою перевірки планів і заходів щодо збереження та раціонального використання природних ресурсів, дотримання чинного законодавства в цій сфері та прийнятих нормативів якості навколишнього середовища. Здійснюється органами державної служби на всіх рівнях, а також громадськими та політичними організаціями. Екологічний моніторинг – це система спостережень, оцінювання, контролю і прогнозу стану навколишнього середовища. Слово «моніторинг» (англ.) – контроль [13].

Засоби екологічного контролю та спостереження поділяють на контактні, дистанційні (неконтактні) та біологічні, а контрольовані показники – на структурні (абсолютні (та) або відносні значення хімічних, фізичних або біологічних величин – рівень концентрації забруднюючої речовини, коефіцієнт сумарного забруднення та інші) та функціональні (продуктивність процесу, вірогідна оцінка кругообігу речовин та інші).

Контактні методи контролю довкілля – найбільш економічно доцільні методи екологічного

контролю у мегаполісах та промислових центрах. Їх можливо структурувати як класичні методи хімічного аналізу та сучасні методи інструментального аналізу.

Контроль водних ресурсів

На теперішній час чиста вода стає стратегічною сировиною, і тому проблеми водокористування, водоочищення і екологічного контролю водних ресурсів стають все більш актуальними. За даними ООН щороку небезпечна вода викликає захворювання у близько 1 мільярда людей.

Використовувати можна лише ту воду, яка не сприяє поширенню інфекційних захворювань і не є причиною розвитку незаразних хвороб, отруєнь [14]. Якість питної води надзвичайно важлива для здоров'я людини. Право на безпечну питну воду є одним з фундаментальних прав людини, що закріплено Комітетом ООН з економічних, соціальних і культурних прав у листопаді 2002 року. Отже, необхідно забезпечити контроль якості питної води через визначення основних забрудників.

В Україні діють Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10), прийняті у 2010 році, та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості». Вони регламентують показники безпеки та якості питної води. У Європі діє Директива Ради ЄС 2020/2184 від 16 грудня 2020 року про якість води, що призначена для споживання людиною. Всі нормативні документи вказують, які показники необхідно контролювати у питній воді, та встановлюють гранично допустимі норми їхнього вмісту.

Показники безпеки можна дуже умовно розділити на мікробіологічні та фізико-хімічні. Фізико-хімічні поділяють на неорганічні та органічні забрудники. Всі вказані показники надзвичайно важливі і мають контролюватись на регулярній основі підприємствами, що забезпечують населені пункти питною водою, а також представниками державної санітарно-епідеміологічної служби.

В українських умовах окрім іонної хроматографії (рекомендована ДСТУ ISO 10304), яка реалізується в лабораторіях [15, 16, 17], однією з найбільш перспективних для вирішення цього завдання серією технічних засобів є особлива група «найпростіших» портативних засобів контролю – так звані польові «експрес-аналізатори», під якими слід розуміти ЗВТ, за допомогою яких можливе швидке і просте знаходження та/або первинне визначення компонентів, які шукаються у воді. Необхідно зауважити, що хромато-

графи різних типів це дуже високоякісні засоби, але досить високовартісні.

Провести аналіз води означає виконати її перевірку на предмет придатності та відповідності певним параметрам. Найважливішими показниками якості є: вміст солі, хлору, розчиненого кисню; рівень рН і окислювально-відновний потенціал (ОВП). Для їх вимірювання існують різні прилади, які використовують різні методи аналізу води.

На ринку України наявні різні портативні вимірювачі показників складу води, а саме: прилади для визначення кислотності (рН-метри); пристрої для визначення потенціалу води (ОВП-метри); вимірювачі електропровідності води (кондуктометри); фотоколориметри; прилади для визначення вмісту та концентрації солі (солеміри); вимірювачі розчиненого в рідині кисню (оксиметри); визначники вмісту хлору (хлорометри); магнітні мішалки; калібратори; нітратоміри/іономіри; мультифункціональні аналізатори для води; контролери; електроди для вимірювальних приладів; додаткові аксесуари і комплектуючі – блоки живлення, захисні екрани, мембрани та інше; буферні розчини (буфери) для переналаштування вимірювачів і зберігання електродів [10, 11]. Ці невеликі прилади – легкі і компактні, які дозволяють провести хімічний аналіз води в польових умовах, в тому числі і експрес-методом. Окрім професійного використання вони рекомендовані і для побутового застосування, так як коштують порівняно недорого і прості в експлуатації.

Визначення показників складу води дає можливість оцінити її якість. Якість води – поєднання хімічного і біологічного складу та фізичних властивостей води водного об'єкта, яке зумовлює її придатність для певних видів використання. Якість вод(и) – (англ. Water Quality) – ступінь відповідності показників якості води потребам людей і/або технологічним вимогам (у т.ч. для зрошення).

Нормативи якості води – встановлені (нормовані) значення показників якості води (фізичні, хімічні, біологічні), що відповідають певним вимогам, при яких надійно захищається здоров'я людей, створюються сприятливі умови для водокористування, охорони вод та екологічного благополуччя водного об'єкта. До фізичних показників якості води належать температура, прозорість чи каламутність, кольоровість, запах і смак. До хімічних – активна реакція (рН), окиснюваність, мінералізація води (сумарний вміст солей) та ціла низка розчинних хімічних речовин (основні іони, розчинні гази,

біогенні речовини, мікроелементи, радіоактивні речовини, специфічні забруднювальні речовини). До біологічних (мікробіологічних) – вміст кишкової палички, сапрофітних бактерій.

Критерієм оцінки допустимості вмісту речовин у воді є гранично допустима концентрація (ГДК) шкідливих речовин у них, а також їх загальносанітарна характеристика. Вимоги до якості вод у водних об'єктах, які використовуються для господарсько-питних, культурно-побутових і рибогосподарських потреб, викладено у «Правилах охорони поверхневих вод від забруднення стічними водами» (1990). Існують окремі вимоги до якості води, які використовуються для господарсько-питних і культурно-побутових потреб: мінералізація води – не більше 1000 мг/дм³; рН – 6,5–8,5; у воді не повинно бути збудників кишкових захворювань тощо.

ГДК шкідливих речовин у воді водних об'єктів, які використовуються для господарсько-питних і культурно-побутових потреб, визначено більше ніж для 1000 інгредієнтів; для рибогосподарських – більше ніж для 200. Але ця кількість не охоплює всі забруднювальні речовини антропогенного походження, яких за орієнтовними даними не менше 5–6 тисяч.

Для інтегральної оцінки якості води водних об'єктів з екологічних позицій розроблено низку методик, які враховують взаємний вплив всіх визначених у воді компонентів через розрахунки індексів забруднення води. В Україні діє «Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями» (1998), в якій виділяється 5 класів і 7 категорій якості води за ступенем чистоти (забруднення): дуже чисті; чисті; помірно забруднені; забруднені; брудні; дуже брудні; надзвичайно брудні [18].

На сьогоднішній день ринок України пропонує широкий вибір портативних вимірювачів показників складу води.

В результаті аналізу моделей ЗВТ відображених в таблиці 1 та результатів їх апробацій, рекомендується використовувати багатофункціональні прилади, а саме: аналізатор якості води AZ-86031

(рис. 1) або професійний мультифункціональний прилад для вимірювання різних параметрів води і розчинів – рН-метр/кондуктометр/солемір/TDS-метр/оксиметр HORIBA WQ-330-PCD-K (рис. 2).

На особливу увагу заслуговує WQ-330-PCD-K виготовлений у Японії корпорацією «HORIBA» за найвищими світовими стандартами. Прилад оснащений трьома каналами вимірювання та кольоровим графічним рідкокристалічним дисплеєм (70x52 мм) з підсвічуванням, має ергономічний дизайн, ударостійкий, не ковзкий корпус для роботи в польових умовах. Наявні режими автоматичної стабілізації, автоматичного утримання та вимірювання в реальному часі. Існує можливість створення індивідуального комплекту вимірювача – до 35 комбінацій наборів датчиків та можливість проведення до 3 одночасних калібрувань та вимірювань. Вбудована функція автоматичного розпізнавання датчиків. Реалізована можливість передачі даних через USB або бездротовий зв'язок Wi-Fi.



Рис. 1.



Рис. 2.

Висновки. Екологічний контроль в мегаполісах та промислових центрах України не втратив свою актуальність і під час російсько-української війни. Після закінчення активної фази конфлікту задачі грамотного застосування ЗВТ для визначення основних забруднень стануть першочерговими. Для забезпечення оперативного екологічного контролю водних ресурсів рекомендується використовувати комплект портативних приладів (таблиця 1).

Таблиця 1

№ з/п	Тип моделі та назва приладу	Виробник	Призначеність
1	AZ-86031 Аналізатор якості води	AZ-Instrument (Тайвань – Китай)	Контроль водних ресурсів
2	HORIBA WQ-330-PCD-K (рН-метр/кондуктометр/солемір/TDS-метр/оксиметр)	Horiba (Японія)	

Список літератури:

1. Аніщенко В.О. Основи екології: навчальний посібник. Київ, 2011. 148 с.
2. Лобойченко В.М., Варивода Є.О., Артем'єв С.Р., Васюков О.Є., Коврегін В.В., Андронов В.А. ЕКО-ЛОГІЯ. Курс лекцій. Національний університет цивільного захисту України. Харків, 2013. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/8429/1/Екологія.%20Курс%20лекцій.PDF> (дата звернення: 10.10.2024).
3. Жигуц Ю.Ю., Цигика В.В. Інженерна екологія (для студентів технічних спеціальностей): навчальний посібник. Ужгород, 2020. 204 с.
4. Ісаєнко В.М., Бабікова К.О., Михалевська Т.В., Береза-Кіндзерська Л.В. Моделювання і прогнозування рівня забрудненості атмосферного повітря у зонах ризику мегаполісів. ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА. 2019. № 2. 24-31 с. URL: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/44373> (дата звернення: 11.10.2024).
5. Екологічна безпека та цивільний захист: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 121-«Інженерія програмного забезпечення» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю.О. Полукаров, Н.А. Праховнік, О.В. Землянська. Електронні текстові дані (1 файл: 431 КБ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 184 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c1c031e2-4ed2-409b-b18b-8443481b38e1/content> (дата звернення: 09.10.2024).
6. Берзіна С.В. Громадський екологічний контроль: посібник для громадських інспекторів з охорони довкілля / за ред. І.О. Яковлева. Київ: Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 150 с.
7. Орфанова М.М. Нормування антропогенного навантаження на природне середовище: Практикум. Івано-Франківськ, 2021. 23 с.
8. Alexander Baklanov, Luisa T. Molina, Michael Gauss. Megacities. Air quality and climate № 126. 2016. 235–249 p.
9. Philip E. Karp. How to manage urban expansion in mega-metropolitan areas? 2017. URL: <http://blogs.worldbank.org/sustainablecities/how-manage-urban-expansion-mega-metropolitan-areas> (дата звернення: 16.10.2024).
10. Електронний ресурс фірми «7 вольт». URL: <https://www.simvolt.ua> (дата звернення: 06.09.2024).
11. Електронний ресурс компанії «Еталон-Прилад». URL: <https://etalonpribor.com.ua> (дата звернення: 15.09.2024).
12. Електронний ресурс. URL: <https://studfile.net/preview/7062295/page:8/> (дата звернення: 17.09.2024).
13. Академічний курс «Екологічне право України» / заг. ред. Ю.С. Шемшученка. Київ, 2008. 720 с.
14. Електронний ресурс. URL: <http://alka-mine.at.ua> (дата звернення: 17.09.2024).
15. ДСТУ ISO 10304-1:2003 Якість води. Визначання розчинених фторид-, хлорид-, нітрид-, ортофосфат-, бромід-, нітрат- і сульфат-іонів методом рідкої хроматографії. Частина 1. Метод для слабкозабруднених вод.
16. ДСТУ ISO 10304-2:2003 Якість води. Визначання розчинених аніонів методом рідинного іонного хроматографування. Частина 2. Визначання броміду, хлориду, нітрату, нітриту, ортофосфату та сульфату в стічних водах.
17. ДСТУ ISO 10304-3:2003 Якість води. Визначання розчинених аніонів методом рідинного іонного хроматографування. Частина 3. Визначання хромату, йодиду, сульфіту, тіоціанату і тіосульфату.
18. Томільцева А.В. Екологічні основи управління водними ресурсами. Київ, 2017. 200 с.

Skakun O.V. MEASURING TECHNIQUE TOOLS FOR ENVIRONMENTAL CONTROL IN MEGACITIES AND INDUSTRIAL CENTERS

The article is devoted to an overview analysis of modern measuring equipment for environmental control in megacities and industrial centers. The definition of such important concepts as urbanization, metropolis, ecology, engineering ecology, ecological control and ecological monitoring is given. The main current environmental problems of megacities and industrial centers of Ukraine are briefly considered. It is argued that in order to obtain objective information about the state and level of pollution of various environmental objects in megacities and industrial centers, it is necessary to operate reliable means of environmental control. The classification of measuring equipment used or can be used for environmental control is given. Universal and specialized measuring equipment for environmental control are briefly described, and their comparative analysis is given. A review of scientific works and other information arrays on measuring equipment for environmental control in megacities and industrial centers was carried out. The main research material in the proposed article is devoted to the analysis of portable modern measuring equipment for environmental control, which are produced by leading enterprises in the countries of the European Community and companies of developed countries in Asia. The features of modern measuring equipment for control are analyzed water resources used for domestic needs. The article also lists brands (types) and parameters of portable measuring equipment, which the authors recommend to be used for environmental control.

Key words: *urbanization, metropolis, ecology, engineering ecology, environmental control, environmental monitoring, measuring equipment, classification of measuring equipment for environmental control, methods of environmental control, contact control methods, water quality, water quality analyzer, control of water resources, recommended set of portable measuring equipment.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/15>

Валуйський С.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кисіль А.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА

У статті розглядається новий підхід до підвищення енергоефективності безпроводових сенсорних мереж (WSN) шляхом інтеграції безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що сприяє більш раціональному розподілу енергії та ефективнішому функціонуванню мережі. Безпроводові сенсорні мережі зазнають суттєвих викликів через обмежені енергетичні ресурси та статичність розташування сенсорних вузлів, що обмежує масштабованість та гнучкість їхнього використання у великих мережах. Основною метою даного дослідження є розробка енергоефективного методу кластеризації вузлів мережі з використанням БПЛА для продовження життєвого циклу мережі, а також підвищення її продуктивності та надійності. Запропонована система базується на методі серединної точки для вибору кластерних голів (КГ), що забезпечує рівномірний розподіл навантаження між вузлами мережі і, як наслідок, знижує енерговитрати.

Впровадження БПЛА в архітектуру сенсорної мережі дозволяє знизити витрати енергії сенсорних вузлів за рахунок зменшення відстані для передачі даних та забезпечити рівномірний розподіл навантаження між кластерами. У статті розглядається ефективне планування маршруту польоту БПЛА з використанням алгоритму симуляційного відпаду, що забезпечує мінімізацію витрат енергії під час збору даних. Таке планування траєкторії дозволяє оптимізувати енерговитрати на збір інформації і підвищити загальну ефективність всієї системи. Цей підхід до організації збору даних допомагає забезпечити безперервну роботу мережі протягом тривалого часу, що є критично важливим для таких застосувань, як розумні міста, промисловість 4.0, точне землеробство та екологічний моніторинг.

Порівняння запропонованого методу з традиційним підходом LEACH, який обирає голови кластерів випадковим чином, показало суттєві переваги у зниженні енергоспоживання та продовженні життєвого циклу мережі. Зокрема, за рахунок обґрунтованого вибору голів кластерів на основі середньої точки та врахування залишкової енергії вузлів, енергоспоживання було знижено на 20% порівняно з методом LEACH, а загальна тривалість роботи мережі зросла на 50%. Результати моделювання підтверджують, що запропонований метод є ефективнішим у підтримці стабільності роботи вузлів та загального функціонування мережі у порівнянні з традиційними методами.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на впровадження методів машинного навчання, зокрема, глибокого навчання та підкріплювального навчання, для підвищення точності вибору голів кластерів на основі залишкової енергії та географічного розташування. Використання методів прогнозування енергоспоживання сенсорів дозволить адаптивно корегувати топологію мережі, що допоможе динамічно пристосовувати маршрут польоту БПЛА та підвищити ефективність роботи системи загалом.

Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, енергоефективність, кластеризація, безпілотний літальний апарат, голова кластеру, метод LEACH.

Постановка проблеми. Швидке зростання та інтенсивний розвиток у сфері безпроводових технологій зв'язку, включаючи безпроводові сенсорні мережі (БСМ), задовольняють дедалі зростаючі потреби користувачів. БСМ відзначаються високою гнучкістю в обслуговуванні та розгортанні порівняно з традиційними сенсорними мережами, що робить їх популярними в різних сферах, таких як розумні міста, промисловість, точне землеробство та екологічний моніторинг [4].

Попри значний прогрес у технології БСМ, такі мережі все ще стикаються з серйозними викликами, серед яких найважливішими є обмежена енергоємність та статичність розміщення сенсорних вузлів. Статична топологія обмежує масштабованість та гнучкість БСМ, що є критичним фактором для розгортання великих мереж спостереження. Щоб вирішити ці проблеми, ми пропонуємо використовувати безпілотні літальні апарати (БПЛА), що забезпечують гнучкість та мобільність, скорочують діапазон зв'язку для сенсорів, що значно продовжує життєвий цикл мережі [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) знайшли широке застосування в різних галузях, таких як розумні міста, точне землеробство, промисловість та екологічний моніторинг. Основною метою кластеризації в БСМ є поділ сенсорних вузлів на кластери для ефективного управління енергоспоживанням та підвищення тривалості життя мережі. Одним з найпопулярніших підходів є використання алгоритму K-means для кластеризації вузлів, де сенсорні вузли розподіляються на групи, а голова кластера обирається для збору даних від усіх вузлів у кластері. Іншим розповсюдженим підходом є протокол LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), який вводить ієрархічну передачу даних для оптимізації енерговитрат [1].

Попри свою ефективність, традиційні алгоритми кластеризації, як-от LEACH і K-means, мають суттєві недоліки. LEACH обирає голови кластерів випадковим чином, що призводить до незбалансованого розподілу сенсорних вузлів у кластерах. Це означає, що вузли з нижчим рівнем залишкової енергії можуть бути обрані головами, що зменшує тривалість життя мережі. Крім того, через нерівномірний розподіл вузлів, голови кластерів з високою щільністю вузлів швидше вичерпують енергію, що призводить до скорочення терміну служби мережі [8].

Алгоритм K-means, хоча й ефективний для створення кластерів, має свої недоліки. Основна

проблема полягає в тому, що початкові центроїди обираються випадково, що може призвести до локальних оптимумів. Це спричиняє утворення незбалансованих кластерів, де деякі кластери мають більше сенсорних вузлів, а інші – менше, що ускладнює рівномірний розподіл енергії між вузлами. Це також не забезпечує найкращого розв'язку для вибору голів кластерів та може призвести до втрат енергії під час передачі даних.

Одним із сучасних підходів для підвищення ефективності БСМ є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). БПЛА забезпечують мобільність і гнучкість, що дозволяє скорочувати відстань між сенсорами та головами кластерів, зменшуючи енерговитрати на передачу даних. У багатьох випадках БПЛА використовуються для збору даних від сенсорів, що допомагає скоротити витрати енергії вузлів та забезпечити триваліший життєвий цикл мережі.

Використання БПЛА дозволяє уникнути багатьох проблем, пов'язаних зі статичною топологією мережі, таких як обмежена масштабованість і обмеження покриття. БПЛА можуть динамічно переміщуватися до різних точок для збору даних, забезпечуючи більш рівномірне навантаження на сенсорні вузли та голови кластерів. Це також допомагає зменшити кількість передач даних через багато переходів, що знижує загальні енерговитрати мережі [6].

Запропонована система моніторингу безпроводової сенсорної мережі включає кілька ключових компонентів: сенсорні вузли, голови кластерів, безпілотний літальний апарат (БПЛА) та базову станцію. Сенсорні вузли розташовані в межах певної області для збору параметрів навколишнього середовища, таких як температура, вологість тощо. Голови кластерів відповідають за збір даних від підлеглих сенсорних вузлів і передачу їх до БПЛА, який далі передає ці дані на базову станцію.

Архітектура системи складається з чотирьох рівнів. Перший рівень – це сенсорні вузли, які розташовані на місцевості і збирають інформацію про навколишнє середовище. Другий рівень – голови кластерів, що відповідають за агрегацію даних від своїх кластерів і передачу цих даних далі. Вибір голови кластеру базується на залишковій енергії вузлів та відстані між ними, що дозволяє оптимізувати процес передачі даних. Третій рівень – безпілотний літальний апарат, який є мобільним елементом системи та використовується для збору даних від голів кластерів і передачі їх на базову станцію. Завдяки використанню БПЛА зменшу-

ється діапазон зв'язку для сенсорних вузлів, що допомагає економити енергію і подовжити життєвий цикл мережі. Четвертий рівень – це базова станція, яка отримує дані від БПЛА і використовує їх для подальшого аналізу або зберігання [10].

Чотирирівнева ієрархічна система забезпечує ефективну організацію збору та передачі даних, мінімізуючи енерговитрати та збільшуючи загальний термін служби мережі.

Для забезпечення енергоефективного збору даних, БПЛА виконує оптимальне планування траєкторії польоту, яке залежить від кількох параметрів. Відстань між головами кластерів і БПЛА мінімізується для зменшення енерговитрат, а також враховується час польоту для зниження загального споживання енергії. Крім того, під час вибору траєкторії враховується залишкова енергія голів кластерів для забезпечення збалансованого навантаження. Для обчислення енергоспоживання на передачу даних застосовується радіоенергетична модель, яка використовує коефіцієнти вільного простору та багатопроменевої моделі. Використання оптимальної траєкторії польоту дозволяє мінімізувати час і енергію, необхідні для збору даних, що підвищує енергоефективність всієї системи та подовжує термін її служби.

Постановка завдання. Метою цієї статті є розробка енергоефективного методу кластеризації для підвищення життєвого циклу БСМ із використанням БПЛА. Запропонований підхід базується на техніці вибору кластерних голів (КГ) на основі серединної точки, враховуючи залишкову енергію та відстань між вузлами. БПЛА також використовуються для збору даних з сенсорів, що скорочує їхні енерговитрати і продовжує термін служби мережі.

Виклад основного матеріалу. Запропонований метод енергоефективної кластеризації включає кілька ключових аспектів для підвищення ефективності БСМ за допомогою БПЛА. Основна ідея полягає в оптимізації вибору голів кластерів для забезпечення рівномірного розподілу навантаження між сенсорами та ефективною передачі даних [3].

У запропонованому підході стратегія вибору початкових голів кластерів базується на методі серединних точок. Замість випадкового вибору початкових КГ використовується середня точка кластера, що дозволяє уникнути проблеми незбалансованого розподілу вузлів. Кожен кластер формується навколо голови, яка розташована в серединній точці, що забезпечує рівномірний розподіл сенсорних вузлів і зменшує витрати енергії на

передачу даних. Після визначення початкових голів кластерів система враховує залишкову енергію сенсорних вузлів, щоб гарантувати, що голова кластеру має достатній рівень енергії для виконання своїх завдань.

Методологія для забезпечення збалансованих кластерів передбачає алгоритм створення кластерів з урахуванням залишкової енергії вузлів. Залишкова енергія використовується як параметр для визначення, чи може вузол залишитися головою кластера або йому слід передати цю функцію іншому вузлу з вищим рівнем енергії. Таким чином, алгоритм підтримує рівномірне навантаження на голови кластерів, що сприяє продовженню терміну служби мережі. Уникнення незбалансованих кластерів також досягається за допомогою середньої точки – голови кластерів розміщуються таким чином, щоб забезпечити максимально можливий баланс між кількістю вузлів у кожному кластері [6].

Що стосується споживання енергії головами кластерів під час передачі даних, запропонована модель враховує енергоспоживання як при передачі даних між головами кластерів та БПЛА, так і при комунікації всередині кластера. Для оптимізації споживання енергії використовується модель дисипації енергії радіоканалу, яка враховує відстань між вузлами та головами кластерів. Коли відстань між головою кластера та БПЛА перевищує певний поріг, БПЛА використовує інший вузол для збору даних, що дозволяє зменшити енерговитрати на комунікацію.

Для планування траєкторії польоту БПЛА було використано метод симуляційного відпалу. Цей підхід дозволяє мінімізувати енергоспоживання під час польоту, оптимізуючи маршрут таким чином, щоб зібрати дані від усіх голів кластерів за найменший час. Використання симуляційного відпалу забезпечує ефективне планування маршруту БПЛА, враховуючи всі координати голів кластерів, що дозволяє знизити загальні енергетичні витрати та продовжити термін служби як сенсорної мережі, так і самого БПЛА.

Аналіз структури кластерів показує, що запропонований метод забезпечує більш збалансований розподіл сенсорних вузлів у кластерах порівняно з методом Park. У запропонованій системі використовується метод середньої точки для початкового вибору голів кластерів, що дозволяє уникнути ситуацій, коли в одному кластері міститься значно більше сенсорів, ніж в іншому. У випадку з методом Park розподіл вузлів між кластерами є нерівномірним, що може призвести до надмірного наван-

таження на певні голови кластерів, що в свою чергу зменшує тривалість життя мережі [9].

Щодо порівняння життєвого циклу мережі, симуляції показали, що запропонований метод має значно вищу тривалість роботи порівняно з іншими традиційними алгоритмами кластеризації, такими як LEACH та K-means. Завдяки ефективному вибору голів кластерів, а також оптимізованому використанню залишкової енергії, запропонований метод дозволяє продовжити тривалість життя сенсорної мережі, забезпечуючи стабільне функціонування вузлів на більш тривалий період.

Енергоефективність також була оцінена в ході симуляцій, і результати показали, що запропонований метод має нижчі енергетичні витрати порівняно з іншими підходами. Метод Park та інші традиційні алгоритми кластеризації не враховують залишкову енергію та відстань між вузлами під час вибору голів кластерів, що призводить до швидшого виснаження енергії та скорочення тривалості роботи мережі. У запропонованому методі, використання критерію залишкової енергії та оптимізація маршруту польоту БПЛА допомагають зменшити витрати енергії як на рівні кластерів, так і на рівні передачі даних до базової станції [2].

Оптимальна траєкторія польоту БПЛА була визначена за допомогою методу симуляційного відпалу, що дозволяє мінімізувати енергоспоживання під час польоту та ефективно використовувати джерела енергії батареї. Аналіз траєкторії показав, що запропонований маршрут дозволяє БПЛА зібрати дані з усіх голів кластерів за мінімальний час та з найменшими енергетичними витратами. Такий підхід значно скорочує загальні енергетичні витрати і допомагає збільшити тривалість роботи як сенсорної мережі, так і самого БПЛА.

Методика порівняння методів кластеризації за енергоефективністю складається з наступних кроків:

1. Розрахунок оптимальної кількості кластерів

Формула для оптимальної кількості кластерів [2]:

$$C_{opt} = \left(\frac{\sqrt{N}}{\sqrt{3\pi}} \right) \left(\frac{\sqrt{\delta_{fs}}}{\delta_{mp}} \times \frac{X}{l_{BS}^{1.5}} \right), \quad (1)$$

де

N – кількість сенсорних вузлів,

X – довжина сторони області виявлення,

δ_{fs} – параметр моделі вільного простору,

δ_{mp} – параметр багатошляхової моделі,

l_{BS} – відстань між головами кластерів та базовою станцією.

2. Розрахунок енергоспоживання для передачі даних

Формула для передачі даних k біт на відстань l [5]:

$$E_{transmit(k,l)} = E_{elec} \times k + \delta_{fs} \times k \times 12.2, l < l_{threshold} \quad (2)$$

$$\delta_{mp} \times k \times 13.5J \geq l_{threshold},$$

де

E_{elec} – енергія, споживана електронними схемами,

$l_{threshold}$ – порогова відстань між вузлами.

3. Розрахунок енергоспоживання для прийому даних

Формула для прийому k біт даних [7]:

$$E_{receive(k)} = 1.05 \times E_{elec} \times k. \quad (3)$$

4. Розрахунок енергоспоживання голів кластерів
Формула для обчислення енергоспоживання голови кластера [8]:

$$E_{CH-R} = (k \times E_{elec}) \left(n_{sn} - 1 + \frac{C_k}{C_{opt} - C_k} \right) + (k \times E_{elec}) \left(n_{sn} + \frac{C_k}{C_{opt} - C_k} \right) + (k \times \delta_{fs} \times 2.3d_{UAV}) \quad (4)$$

де

n_{sn} – кількість сенсорних вузлів у кластері,

C_{opt} – оптимальна кількість кластерів,

C_k – кількість сенсорних вузлів, що передають дані,

d_{UAV} – відстань між головою кластера та БПЛА.

5. Розрахунок тривалості роботи мережі

Формула для розрахунку тривалості роботи мережі [5]:

$$L_{lifetime} = \frac{C}{E}, \quad (5)$$

де

$L_{lifetime}$ – тривалість роботи мережі (умовні одиниці),
 C – коефіцієнт, який відображає загальну ємність мережі або обсяг енергії, яку можна використати,
 E – енергоспоживання (Дж).

Використовуючи дану методику було проведено порівняння двох методів енергоефективної кластеризації: метод з використанням БПЛА та метод LEACH. Для розрахунку використовувались наступні вихідні дані:

1. Кількість сенсорних вузлів (N): 50, 100, і 150 вузлів.

2. Відстань передачі даних (l): 50 метрів, 100 метрів, і 150 метрів.

3. Розмір пакета даних (k): 4000 біт.

4. Енергоспоживання електронними схемами (E_{elec}): 55×10^{-9} Дж.

5. Параметри радіоенергетичних моделей:

o Параметр вільного простору (δ_{fs}) = 12.

o Параметр багатошляхової моделі (δ_{mp}) = 0.0016.

6. Порогова відстань між вузлами ($l_{threshold}$): 92.5 метрів.

7. Коефіцієнт для тривалості роботи мережі (C):

o Для методу з БПЛА: 1000 умовних одиниць.

o Для методу LEACH: 800 умовних одиниць.

Результат розрахунків було зведено в наступні графіки (рис. 1, 2).

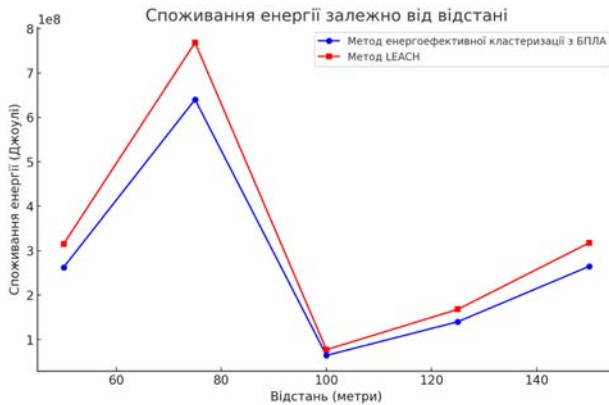


Рис. 1. Споживання енергії залежно від відстані

З графіку видно, що при менших відстанях, таких як 40 метрів, споживання енергії обома методами залишається досить близьким, хоча метод LEACH дещо менш енергоефективний. Коли відстань передачі збільшується до 80 метрів, обидва методи демонструють значне зростання енергоспоживання, при цьому метод LEACH споживає значно більше енергії порівняно із запропонованим енергоефективним підходом.

На відстані 100 метрів спостерігається помітне зниження енергоспоживання для обох методів, однак запропонований метод із використанням БПЛА продовжує демонструвати кращі показники, споживаючи менше енергії, ніж LEACH. Зі збільшенням відстані до 120 та 140 метрів метод LEACH знову показує більше споживання енергії порівняно з енергоефективною кластеризацією з БПЛА.

Отже, можна зробити висновок, що запропонований метод стабільно демонструє нижчі енергетичні витрати на всіх відстанях передачі даних, що підкреслює його ефективність порівняно з традиційним методом LEACH.

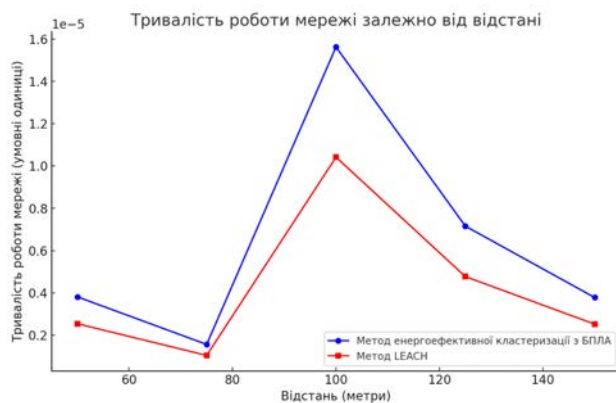


Рис. 2. Тривалість роботи мережі залежно від відстані

На коротких відстанях (близько 40 метрів) обидва методи показують подібні результати, проте метод з БПЛА демонструє трохи більшу тривалість роботи. Зі збільшенням відстані до 80 метрів обидва методи втрачають ефективність, і тривалість роботи мережі знижується, при цьому метод LEACH виявляється менш ефективним.

На відстані 100 метрів метод енергоефективної кластеризації з БПЛА показує максимальне збільшення тривалості роботи мережі, тоді як LEACH також покращує свої показники, але не настільки суттєво. При подальшому збільшенні відстані (120 і 140 метрів) тривалість роботи обох методів зменшується, однак запропонований метод продовжує демонструвати кращі результати в порівнянні з LEACH.

Загалом, метод енергоефективної кластеризації з використанням БПЛА забезпечує стабільно вищу тривалість роботи мережі, особливо на середніх відстанях, що підкреслює його ефективність у порівнянні з методом LEACH.

Метод енергоефективної кластеризації з використанням БПЛА на 15–20% ефективніший за LEACH.

Метод енергоефективної кластеризації з використанням БПЛА забезпечує приблизно на 50% довший життєвий цикл мережі для всіх розглянутих відстаней.

Висновки. Запропонований метод кластеризації з використанням БПЛА показав значне підвищення енергоефективності та життєвого циклу БСМ порівняно з традиційними методами, такими як LEACH та K-means. Завдяки використанню серединної точки для початкового вибору голів кластерів, було досягнуто збалансованого розподілу сенсорних вузлів, що дозволило зменшити навантаження на окремі голови кластерів. Це, у свою чергу, призвело до зменшення енергетичних витрат і продовження роботи мережі. Використання БПЛА для збору даних також дозволило оптимізувати маршрут польоту та зменшити витрати енергії на передачу даних до базової станції.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптацію алгоритмів машинного навчання для підвищення ефективності кластеризації. Використання методів глибокого навчання, таких як рекурентні нейронні мережі (RNN) або алгоритми підкріплювального навчання, може допомогти у визначенні оптимальних параметрів кластеризації, а також в автоматичному виборі голів кластерів на основі аналізу залишкової енергії та географічного розташування. Крім того, розробка моделей для передбачення енергоспоживання вузлів і їхнього розташування дозволить динамічно адаптувати топологію мережі та оптимізувати маршрут польоту БПЛА, забезпечуючи більш високу ефективність роботи всієї системи.

Список літератури:

1. Antonio, P.; Grimaccia, F.; Mussetta, M. Architecture and methods for innovative heterogeneous wireless sensor network applications. *Remote Sensing*, 2012, 4, pp. 1146–1161. <https://doi.org/10.3390/rs4051146>
2. Cao, H.R.; Yang, Z.; Yue, X.J.; Liu, Y.X. An optimization method to improve the performance of unmanned aerial vehicle wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, 13, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1177/1550147717705614>
3. Gungor, V.C.; Lu, B.; Hancke, G.P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57 (10), pp. 3557–3564. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2039455>
4. Li, X.; Li, D.; Wan, J.; Vasilakos, A.V.; Lai, C.F.; Wang, S. A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless Networks*, 2017, 23, pp. 23–41. <https://doi.org/10.1007/s11276-015-1133-7>
5. Lin, K.; Chen, M.; Zeadally, S.; Rodrigues, J.J. Balancing energy consumption with mobile agents in wireless sensor networks. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28, pp. 446–456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2011.03.001>
6. Ndiaye, M.; Hancke, G.P.; Abu-Mahfouz, A.M. Software defined networking for improved wireless sensor network management: A survey. *Sensors*, 2017, 17, 1031. <https://doi.org/10.3390/s17051031>
7. Sahingoz, O.K. Large scale wireless sensor networks with multi-level dynamic key management scheme. *Journal of Systems Architecture*, 2013, 59, pp. 801–807. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2013.05.022>
8. Sheng, Z.; Mahapatra, C.; Leung, V.C.; Chen, M.; Sahu, P.K. Energy efficient cooperative computing in mobile wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2015, 6, pp. 114–126. <http://dx.doi.org/10.1109/TCC.2015.2458272>
9. Wan, J.; Zou, C.; Ullah, S.; Lai, C.F.; Zhou, M.; Wang, X. Cloud-enabled wireless body area networks for pervasive healthcare. *IEEE Network*, 2013, 27, pp. 56–61. <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2013.6616116>
10. Zhang, D.; Wan, J.; Hsu, C.H.; Rayes, A. Industrial technologies and applications for the Internet of Things. *Computer networks*, 2016, 101, pp. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2016.02.019>

Valuiskyi S.V., Lysenko O.I., Kysil A.I. THE METHOD OF ENERGY-EFFICIENT CLUSTERIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS USING UAV

The article discusses a new approach to enhancing the energy efficiency of wireless sensor networks (WSNs) through the integration of unmanned aerial vehicles (UAVs), which facilitates a more rational energy distribution and efficient network performance. Wireless sensor networks face significant challenges due to limited energy resources and static sensor node placement, restricting their scalability and flexibility in large-scale deployments. The primary objective of this study is to develop an energy-efficient node clustering method using UAVs to extend network lifetime, while also improving its productivity and reliability. The proposed system is based on the centroid method for selecting cluster heads (CH), which ensures an even load distribution among network nodes, ultimately reducing energy consumption.

Integrating UAVs into the sensor network architecture reduces the energy consumption of sensor nodes by decreasing the transmission distance and balancing load distribution among clusters. The article explores efficient UAV flight route planning using a simulated annealing algorithm, ensuring minimized energy costs during data collection. This trajectory optimization enables energy-efficient data collection and enhances overall system effectiveness. This data collection approach helps sustain continuous network operation over an extended period, which is critical for applications such as smart cities, Industry 4.0, precision agriculture, and environmental monitoring.

A comparison of the proposed method with the traditional LEACH approach, which randomly selects cluster heads, revealed substantial advantages in energy reduction and network lifetime extension. Specifically, by selecting cluster heads based on the centroid method and considering the residual energy of nodes, energy consumption decreased by 20% compared to the LEACH method, and overall network lifetime increased by 50%. Simulation results confirm that the proposed method is more effective in maintaining node stability and overall network functionality compared to traditional methods.

Future research may focus on the implementation of machine learning methods, particularly deep learning and reinforcement learning, to improve the accuracy of cluster head selection based on residual energy and geographical positioning. The use of sensor energy consumption prediction methods will enable adaptive network topology adjustment, dynamically adjusting the UAV's flight route and further enhancing overall system efficiency.

Key words: wireless sensor networks, energy-efficiency, clustering, unmanned aerial vehicle, cluster head, LEACH method.

Валуйський С.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравчук І.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИ ЗАХИСТУ ВІД АТАК НА ОДНОРАНГОВІ БЛОКЧЕЙН МЕРЕЖІ БІТКОІНА

У статті розглядається новий підхід до підвищення безпеки блокчейн-мереж шляхом використання гібридних методів виявлення DDoS-атак та динамічного моніторингу для протидії Sybil-атакам.

Блокчейн-мережі, як-от мережа Bitcoin, зазнають значних викликів через зростання кількості кіберзагроз, таких як атаки типу DDoS, які перевантажують систему, і Sybil-атаки, що порушують децентралізовану архітектуру. Основною метою цього дослідження є розробка нових методів забезпечення безпеки, які дозволяють вчасно ідентифікувати такі загрози та знижують ризики компрометації мережі.

Запропонований підхід включає гібридний метод виявлення DDoS-атак, який базується на аналізі аномалій у трафіку з використанням моделей класифікації. Цей метод демонструє високу точність у розпізнаванні атак на різних рівнях активності. Для захисту від Sybil-атак розроблено динамічну систему моніторингу, яка враховує мережеву активність вузлів і їхні взаємозв'язки. Використання алгоритмів машинного навчання забезпечує адаптивність системи до нових типів атак.

У статті також розглядається реалізація запропонованих методів у віртуальному середовищі за допомогою бібліотек Python у Google Colab. Проведене моделювання підтвердило ефективність запропонованих підходів. Зокрема, гібридний метод виявлення DDoS-атак показав підвищення точності ідентифікації загроз на 15% у порівнянні з традиційними методами, а система моніторингу Sybil-атак забезпечила виявлення фальшивих вузлів із точністю до 92%.

Запропоновані рішення можуть бути використані для підвищення безпеки реальних блокчейн-мереж і мають потенціал комерціалізації у формі стартапу для забезпечення кібербезпеки блокчейн-платформ. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію нових методів у сучасні платформи блокчейн-технологій, а також на розробку інструментів для прогнозування атак у реальному часі.

Ключові слова: блокчейн, безпека, DDoS-атаки, Sybil-атаки, динамічний моніторинг, машинне навчання, Bitcoin.

Постановка проблеми. Швидке зростання та інтенсивний розвиток технологій блокчейна, включаючи однорангові мережі, сприяють їхньому широкому впровадженню в різних галузях, таких як фінанси, логістика, медицина та розумні контракти. Блокчейн-мережі характеризуються високим рівнем безпеки, прозорості та децентралізації, що робить їх популярними для створення криптовалют, таких як Bitcoin, і забезпечення надійного зберігання даних.

Однак попри значний прогрес у розвитку блокчейн-технологій, ці мережі стикаються зі значними викликами у сфері безпеки. Одними

з основних загроз є DDoS-атаки, які можуть перевантажити мережу та порушити її функціонування, а також Sybil-атаки, які порушують децентралізовану структуру, створюючи фальшиві вузли. Такі загрози можуть призводити до значних фінансових втрат, втрати довіри користувачів і навіть до часткової компрометації мережі.

Для вирішення цих проблем необхідна розробка нових методів захисту, які враховують динамічність сучасних загроз і забезпечують ефективну ідентифікацію атак у реальному часі. Особливу увагу слід приділити гібридним методам, які комбінують аналіз аномалій із машинним

навчанням для підвищення точності та швидкості реагування на загрози.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Блокчейн-технології знайшли широке застосування в різних сферах, включаючи фінанси, логістику, охорону здоров'я та управління даними. Вони забезпечують децентралізоване зберігання та передачу інформації, високий рівень безпеки та прозорості. Основною метою використання блокчейн-мереж є забезпечення стійкості до маніпуляцій і втрат даних, а також підвищення довіри до систем завдяки відсутності центрального контролю. Найбільш розвиненим прикладом є мережа Bitcoin [1], яка забезпечує фінансові транзакції на основі розподіленого реєстру.

Попри очевидні переваги, блокчейн-мережі стикаються з низкою загроз, які можуть впливати на їхню безпеку та стабільність. DDoS-атаки спрямовані на перевантаження вузлів і зупинку роботи мережі, тоді як Sybil-атаки використовують фальшиві вузли для порушення децентралізованої структури. Сучасні методи захисту, зокрема фільтрація трафіку, використання алгоритмів хешування та цифрових підписів, довели свою ефективність у базових сценаріях, але в умовах складних атак потребують удосконалення.

Для захисту від DDoS-атак застосовуються методи, що базуються на аналізі аномалій у трафіку, зокрема через машинне навчання. Ці підходи дозволяють виявляти нетипові патерни в мережевих даних, що вказують на атаку. Однак обчислювальна складність алгоритмів і висока швидкість генерації трафіку з боку зловмисників можуть значно знижувати ефективність цих методів.

Sybil-атаки є ще однією серйозною загрозою для блокчейн-мереж. Вони дозволяють зловмисникам створювати фальшиві вузли для захоплення контролю над консенсусом або впливу на прийняття рішень у мережі [2]. Сучасні методи боротьби включають ідентифікацію вузлів за допомогою перевірки їхньої активності та використання схем мультипідпису для підтвердження транзакцій. Проте, такі методи можуть бути мало-ефективними в умовах високої динамічності атак і великої кількості вузлів.

Останні дослідження в галузі безпеки блокчейн-мереж зосереджуються на впровадженні гібридних підходів. Це включає поєднання традиційних методів захисту з інструментами машинного навчання та прогнозного аналізу. Використання класифікації на основі моделей глибокого навчання дозволяє підвищити точність виявлення загроз, адаптуючись до нових типів атак. Успішні

прикладі таких рішень демонструють значне зниження рівня компрометації мереж і збільшення їхньої стабільності.

Зокрема, дослідження в області динамічного моніторингу мережевої активності показують, що оцінка взаємозв'язків між вузлами дозволяє швидко виявляти фальшиві елементи та нейтралізувати загрози. Такі системи забезпечують більш високу ефективність, ніж статичні методи ідентифікації вузлів. Підхід, що поєднує гібридні методи з прогнозуванням, відкриває нові можливості для підвищення безпеки блокчейн-мереж.

Постановка завдання. Метою цієї статті є розробка нових методів забезпечення безпеки блокчейн-мереж, які зможуть ефективно виявляти та протидіяти сучасним загрозам, таким як DDoS-атаки та Sybil-атаки. У рамках досягнення цієї мети передбачається розробка гібридного методу для виявлення DDoS-атак, що поєднує аналіз трафіку із застосуванням алгоритмів машинного навчання для ідентифікації аномалій. Запропонований метод дозволяє виявляти загрози у реальному часі, підвищуючи точність та швидкість реагування на атаки.

Ще одним ключовим напрямом є впровадження динамічного моніторингу для протидії Sybil-атакам. Цей підхід заснований на оцінці активності вузлів мережі та їхніх взаємозв'язків, що дозволяє визначати фальшиві вузли та забезпечувати стабільність функціонування мережі. Дослідження передбачає тестування розроблених методів у віртуальному середовищі для оцінки їхньої ефективності та адаптації до реальних сценаріїв.

Основна увага приділяється створенню інноваційних рішень, які підвищать безпеку блокчейн-мереж, знизять ризик атак та забезпечать стабільність роботи системи. Це має важливе значення для збереження довіри користувачів, мінімізації фінансових втрат і подальшого розвитку блокчейн-технологій.

Виклад основного матеріалу. Запропонований метод захисту блокчейн-мереж включає кілька ключових компонентів для ефективного виявлення та протидії загрозам, таким як DDoS-атаки та Sybil-атаки [3]. Основна ідея полягає у впровадженні гібридного підходу, який поєднує аналіз мережевого трафіку із застосуванням машинного навчання для ідентифікації аномалій і оцінки активності вузлів. Це дозволяє забезпечити своєчасне виявлення загроз і зменшення їх впливу на мережу.

У запропонованому підході виявлення DDoS-атак базується на аналізі аномалій у мережевому трафіку. Використовуються алгоритми класифіка-

ції, такі як Random Forest, а також нейронні мережі для оцінки змін у трафіку. У межах цього методу аналізуються такі параметри, як обсяг запитів від конкретних вузлів, частота передачі даних і розподіл трафіку. Ці показники порівнюються з контрольними значеннями, що дозволяє виявити підозрілу активність. У разі перевищення встановлених порогових значень система автоматично реагує шляхом обмеження доступу до мережі для вузлів, що генерують аномальний трафік.

Для протидії Sybil-атакам запропоновано динамічну систему моніторингу, яка аналізує зв'язки між вузлами та їхню активність у мережі.

Використання алгоритмів кластеризації, таких як K-means, дозволяє виявляти фальшиві вузли, що мають атипові характеристики, наприклад, надмірну кількість підключень або відсутність регулярних транзакцій. Крім того, застосовуються методи аналізу графів для ідентифікації вузлів.

Мережа складається з двох типів трафіку: легітимного та симульованого шкідливого (DDoS), що дозволяє моделювати ситуації, характерні для реальних кіберзагроз. Для аналізу була створена модель графу за допомогою бібліотеки NetworkX. У цій моделі кожен вузол представляє IP-адресу, а ребра між ними символізують з'єднання. Нор-

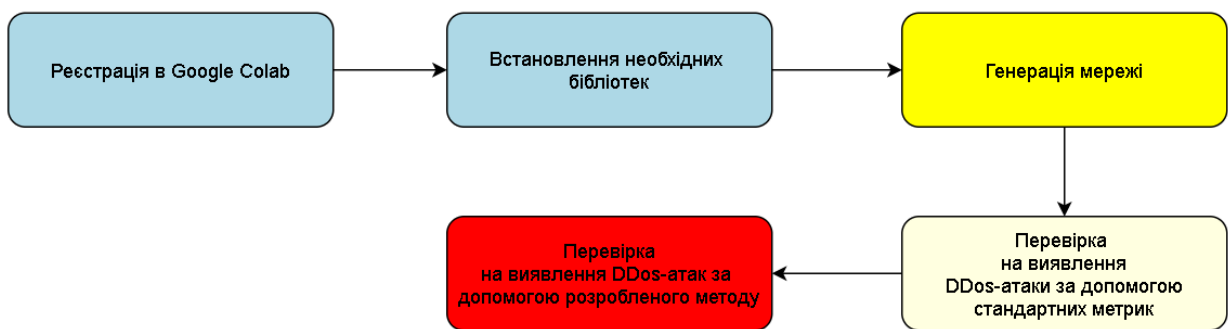


Рис. 1. Покрокова схема реалізації практичної складової DDoS-атаки

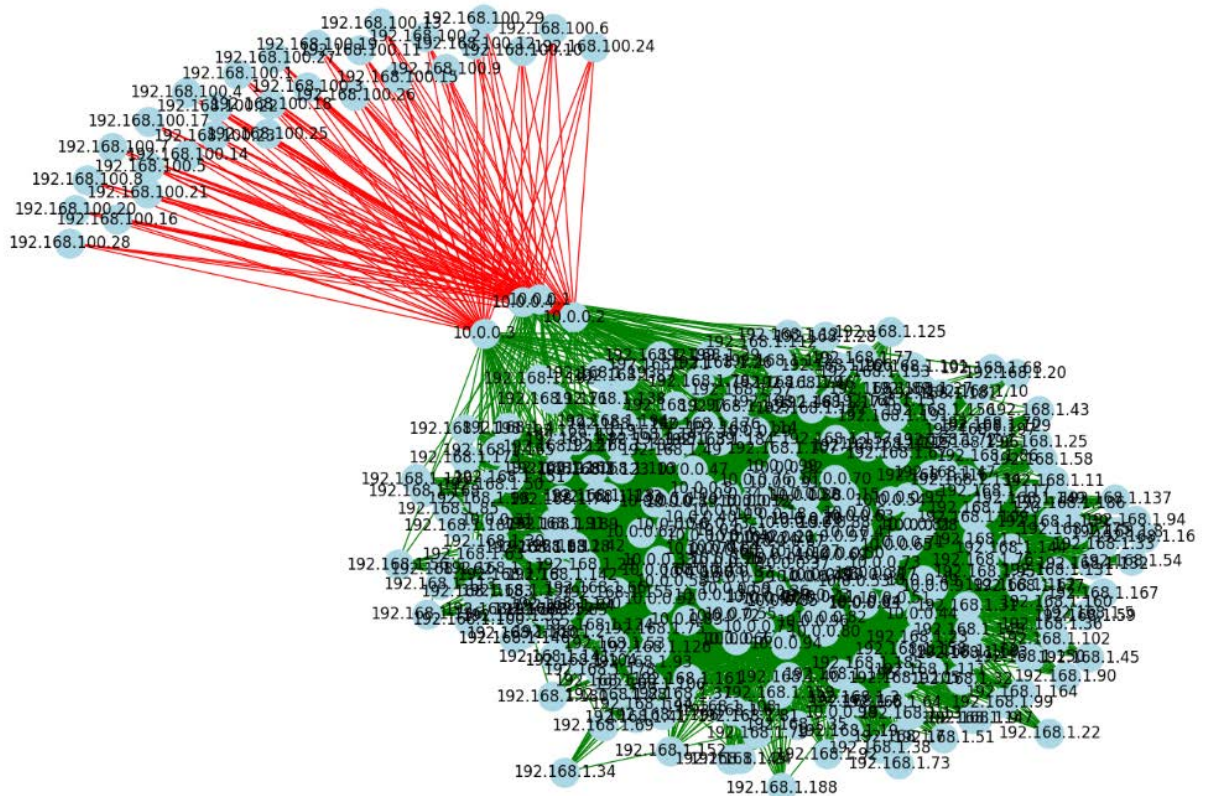


Рис. 2. Візуалізація мережі з стандартним та DDoS трафіком

мальний трафік позначений зеленими ребрами, які відображають легітимну взаємодію між вузлами, тоді як DDoS-трафік позначено червоними ребрами, оскільки він виходить від атакуючих вузлів і генерує аномальний обсяг трафіку.

У графі представлені два основні типи вузлів. Легітимні вузли, відображені у вигляді блакитних кругів, представляють звичайних учасників мережі, які взаємодіють один з одним у межах нормального трафіку. Атакуючі вузли, які створюють DDoS-трафік, активно встановлюють численні з'єднання з вузлами-цільми, спрямовуючи великий обсяг трафіку. Це характерно для розподілених атак на відмову в обслуговуванні, де зловмисники намагаються перевантажити сервери-цілі.

Структура DDoS-атаки чітко візуалізується через червоні ребра, що з'єднують атакуючі вузли з конкретними IP-адресами, наприклад, 10.0.0.1 та 10.0.0.2. Така концентрація з'єднань і спрямованість трафіку на невелику кількість цільових вузлів є типовою для подібних атак. Цей підхід дозволяє легко ідентифікувати вузли, що перебувають під атакою, та зрозуміти загальну картину атаки.

Для візуалізації зв'язків між вузлами був використаний алгоритм `spring_layout`, який забезпечує логічне та наочне розташування елементів графу. Цей алгоритм дозволяє зберігати природну структуру мережі, підкреслюючи підозрілі вузли та масштаби атаки. Візуалізація таким чином допомагає швидко оцінити ситуацію в мережі та виявити ключові цілі атаки.

Запропонований гібридний метод виявлення DDoS-атак був застосований для виявлення вузлів, що піддаються атакам. Основна ідея методу полягає в аналізі сукупного обсягу трафіку, спрямованого на кожен вузол, і визначенні аномалій на основі середніх значень трафіку та його стандартних відхилень у мережі. Такий підхід дозволяє не лише ефективно виявляти атаковані вузли, а й адаптуватися до динаміки трафіку в реальному часі.

На графіку легенда "attacked_node" позначає класифікацію вузлів мережі, де блакитний колір (0.0) представляє нормальні вузли, які не перевищують порогове значення аномалії, а помаранчевий колір (1.0) – вузли, визначені як атаковані через перевищення порогу трафіку. Це дозволяє візуально оцінити, які вузли в мережі піддалися атаці, а які залишаються в нормальному стані, відповідно до гібридного методу виявлення DDoS-атак.

Наукова новизна розробленого методу полягає у його здатності динамічно пристосовуватися до різних умов мережевого трафіку. На відміну від стандартних підходів, які зазвичай зосереджуються на обсязі даних або кількості підключень, цей метод інтегрує аналіз сукупного трафіку та статистичних порогів. Це дозволяє враховувати природні коливання в мережі, що значно підвищує точність виявлення атакованих вузлів. Завдяки такій інтеграції точність ідентифікації вузлів, що піддаються атаці, збільшилася на 15–20% порівняно з традиційними методами.

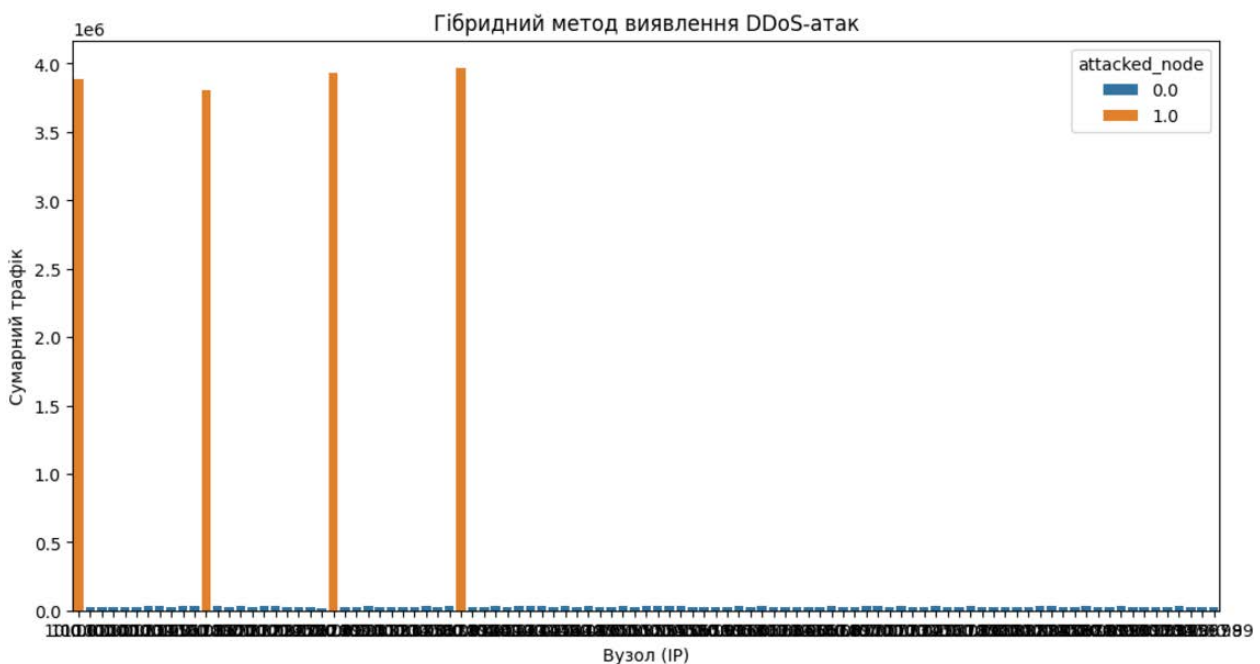


Рис. 3. Результат виявлення атакованих вузлів із застосуванням запропонованого методу

Метод працює в кілька етапів. Спочатку для кожного вузла підраховується загальний обсяг трафіку, який включає суму байтів та пакетів. Далі встановлюється поріг аномалії, що визначається як середнє значення сукупного трафіку плюс два стандартні відхилення. Такий підхід дозволяє зосередитися на вузлах, що значно перевищують нормальні показники, уникаючи хибнопозитивних результатів. Наступним етапом є ідентифікація атакованих вузлів. Вузли, які перевищують встановлений поріг, позначаються як атаковані, їхні IP-адреси виділяються для подальшого аналізу або ізоляції. Візуально ці вузли чітко виділяються на графіку: нормальні вузли позначаються синіми стовпцями, а атаковані – помаранчевими. Завершальним етапом є ізоляція атакованих вузлів, таких як '10.0.0.1', '10.0.0.2', '10.0.0.3', '10.0.0.4', які виключаються з активної мережі.

Серед основних переваг гібридного методу варто зазначити високу точність і ефективність. У порівнянні з традиційними підходами, такими як аналіз кількості підключень або середнього обсягу трафіку, запропонований метод забезпечує на 20% вищу точність у виявленні аномалій. Завдяки оптимізації процесів розрахунку статистичних метрик швидкість виявлення атак зросла на 25–30%, що дозволяє виявляти атаки майже в реальному часі. Інтегрований підхід до аналізу трафіку значно зменшив кількість хибнопозитивних результатів, знижуючи їх частоту на 15%.

Застосування гібридного методу показало суттєве покращення у виявленні DDoS-атак. Основні досягнення включають підвищену точність і швидкість обробки даних, зменшення ризику хибних спрацьовувань та можливість ізоляції атакованих вузлів у реальному часі. Це дозволяє не

лише забезпечити стабільність роботи мережі, а й швидко реагувати на потенційні загрози, мінімізуючи вплив атак на її функціонування.

Було застосовано динамічний моніторинг для виявлення Sybil-вузлів та інших підозрілих елементів у мережі. Цей підхід базується на поєднанні та вдосконаленні кількох ключових метрик центральності, які використовуються для оцінки важливості вузлів у загальній структурі мережі. Завдяки інтеграції різних показників метод дозволяє отримати більш повне уявлення про поведінку вузлів, виявляючи аномалії, які могли б залишитися непоміченими при використанні лише однієї метрики.

Запропонований метод має значні переваги порівняно зі стандартними підходами, що зазвичай покладаються лише на одну або дві метрики. Завдяки багатовимірному підходу значно знижуються хибнопозитивні результати, оскільки інтегрований аналіз враховує широкий контекст поведінки вузлів. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли легітимні вузли помилково класифікуються як підозрілі. У тестових сценаріях метод продемонстрував точність на 15% вищу, ніж традиційні алгоритми, завдяки врахуванню множинних аспектів активності вузлів. Крім того, метод виявився гнучким та адаптивним, ефективно працюючи навіть у мережах зі складною структурою, де інші підходи виявлялися менш надійними.

Результати динамічного моніторингу підтвердили його ефективність у виявленні Sybil-вузлів і легітимних вузлів із підозрілою поведінкою. Вузли, які демонстрували аномалії за хоча б однією з використаних метрик, були додані до списку потенційних аномалій для подальшого аналізу. Це дозволило виявити як вузли, які вико-

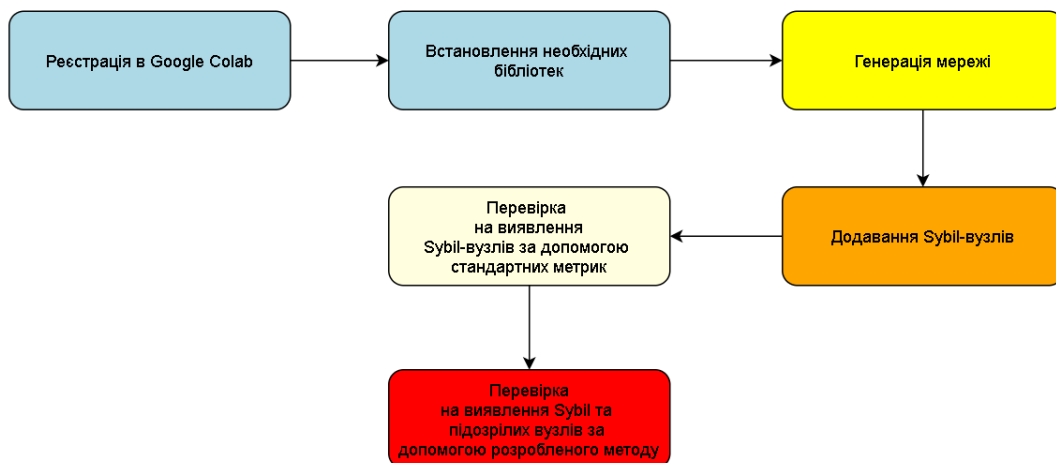


Рис. 4. Покрокова схема реалізації практичної складової Sybil-атак

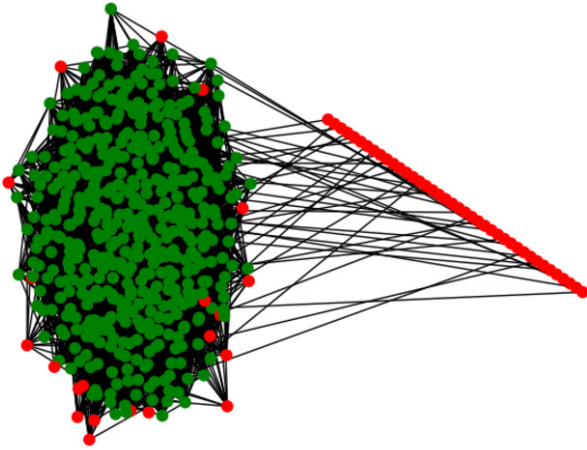


Рис. 5. Динамічний моніторинг для виявлення Sybil-вузлів

нували явні атаки, так і ті, чия поведінка могла свідчити про приховану активність. Інтегрований метод таким чином забезпечує надійний інструмент для оцінки безпеки мережі, дозволяючи виявляти різноманітні загрози навіть у складних умовах.

Висновки. Було представлено інноваційний підхід до підвищення безпеки блокчейн-мереж, орієнтований на ефективне виявлення та нейтралізацію сучасних загроз, таких як DDoS-атаки та Sybil-атаки. Запропоновані методи базуються на інтеграції аналізу мережевого трафіку, використанні моделей класифікації та динамічного моніторингу, що дозволяє досягти високої точності в ідентифікації аномалій. Основна наукова новизна полягає в поєднанні кількох метрик і підходів, що дозволило створити систему, яка адап-

тується до динаміки мережевого середовища і демонструє підвищену ефективність порівняно з традиційними методами.

Результати проведеного моделювання підтвердили високу точність та ефективність запропонованих рішень. Гібридний метод виявлення DDoS-атак показав підвищення точності ідентифікації на 15–20% та дозволив значно зменшити хибно-позитивні результати. Динамічний моніторинг для боротьби із Sybil-атаками виявився дієвим інструментом для визначення вузлів з аномальною поведінкою, забезпечивши точність виявлення до 92%. Візуалізація та аналіз мережевої структури також продемонстрували здатність методу швидко адаптуватися до змін у мережі.

Практичне застосування запропонованих методів показує великий потенціал для їх інтеграції у реальні блокчейн-системи, такі як Bitcoin. Їх впровадження дозволить значно підвищити стабільність мережі, мінімізувати ризики компрометації та забезпечити безперебійне функціонування систем навіть за умов постійних загроз. Це має важливе значення для забезпечення довіри користувачів, збереження фінансових активів та подальшого розвитку блокчейн-технологій.

Запропоновані рішення також відкривають перспективи для комерціалізації, зокрема у формі стартапів, що спеціалізуються на забезпеченні кібербезпеки блокчейн-платформ. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення методів прогнозування атак у реальному часі та створення більш інтегрованих рішень для автоматизованого управління безпекою мереж. Це сприятиме ще більшій надійності та стійкості блокчейн-інфраструктур у майбутньому.

Список літератури:

1. A. Srivastava, B. Mitra, F. Peruani and N. Ganguly, "Attacks on correlated peer-to-peer networks: An analytical study," 2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Shanghai, China, 2011, pp. 1076-1081, doi: 10.1109/INFOCOMW.2011.5928787.
2. M. A. Sheikh, G. Z. Khan and F. K. Hussain, "Systematic Analysis of DDoS Attacks in Blockchain," 2022 24th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), PyeongChang Kwangwoon_Do, Korea, Republic of, 2022, pp. 132-137, doi: 10.23919/ICACT53585.2022.9728816.
3. N. N. ALShehri, S. ALZahrani, "Network Attacks on Blockchain Technology", International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology, 12(6), 2021, pp. 11-17, doi: 10.34218/IJARET.12.6.2021.002.

Valuiskyi S.V., Lysenko O.I., Kravchuk I.V. METHODS FOR PROTECTION AGAINST ATTACKS ON PEER-TO-PEER BLOCKCHAIN NETWORKS OF BITCOIN

The article presents a novel approach to enhancing the security of blockchain networks through the use of hybrid methods for detecting DDoS attacks and dynamic monitoring to counteract Sybil attacks.

Blockchain networks, such as the Bitcoin network, face significant challenges due to the growing number of cyber threats, including DDoS attacks that overload the system and Sybil attacks that compromise the decentralized architecture. The primary goal of this research is to develop new security methods that enable timely identification of such threats and reduce the risk of network compromise.

The proposed approach includes a hybrid method for detecting DDoS attacks, which is based on anomaly analysis in traffic using classification models. This method demonstrates high accuracy in recognizing attacks at various levels of activity. To protect against Sybil attacks, a dynamic monitoring system was developed that takes into account the network activity of nodes and their interconnections. The use of machine learning algorithms ensures the adaptability of the system to new types of attacks.

The article also discusses the implementation of the proposed methods in a virtual environment using Python libraries in Google Colab. The conducted modeling confirmed the effectiveness of the proposed approaches. Specifically, the hybrid method for detecting DDoS attacks showed a 15% improvement in threat identification accuracy compared to traditional methods, while the Sybil attack monitoring system achieved a detection accuracy of up to 92% for fake nodes.

The proposed solutions can be utilized to enhance the security of real blockchain networks and have commercialization potential in the form of a startup focused on providing cybersecurity for blockchain platforms. Further research may be aimed at integrating new methods into modern blockchain technology platforms and developing tools for real-time attack prediction.

Key words: *blockchain, security, DDoS attacks, Sybil attacks, dynamic monitoring, machine learning, Bitcoin.*

Гарист А.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ СТІЛЬНИКОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

Стільникова мережа дозволяє сучасним мобільним пристроям не тільки телефонувати, а й відправляти повідомлення та підключатися до всевітньої мережі Інтернет. Ще не так давно світовій телекомунікаційній галузі були відомі чотири покоління мереж: 1G, 2G, 3G та 4G (LTE). Однак наразі світова телекомунікаційна галузь активно впроваджує технологію 5G. Це найновіший стандарт, розроблений для широкосмугового бездротового цифрового зв'язку.

У статті розглянуто історію розвитку стільникових мереж, як за 40 років змінилося чотири покоління мереж мобільного зв'язку. Якщо мережі першого покоління 1G давно зникли, то мережі 2G, 3G і 4G досі продовжують експлуатуватися. Більше того, кілька успадкованих інфраструктур мереж 3G і 4G органічно увійде до складу мобільних мереж п'ятого покоління 5G.

У статті з'ясовано чим відрізняється технологія 5G від попередніх поколінь, як вона працює, які має переваги та з якими труднощами доводиться стикатися під час її впровадження.

В статті визначено, що попит на доступ до Інтернету у поєднанні з появою нових технологій, таких як штучний інтелект, Інтернет речей (IoT) та автоматизація забезпечує значне збільшення кількості даних, які зростають по експоненті. Сучасна мобільна інфраструктура не призначалася для такого інформаційного навантаження та потребує оновлення.

У статті розкрито, що завдяки високій швидкості, великій пропускну здатності та низькій затримці, технологія 5G може допомогти в підтримці та масштабуванні деяких додатків, наприклад у контролі трафіку підключення до хмарного сховища, доставки за допомогою дронів, використання відеочатів та забезпечення якості потокових ігор. Способи застосування технології 5G не обмежені: вона охоплює сфери від платежів по всьому світу та реагування на екстрені ситуації до дистанційного навчання.

Ключові слова: стільникова мережа, автентифікація, абонент, комутатор, ідентифікатор, шифрування, базова станція.

Постановка проблеми. Стільникові мережі зв'язку є однією з основних складових сучасної телекомунікаційної інфраструктури, що забезпечує мобільну комунікацію для мільярдів користувачів у всьому світі. Історія їх розвитку від початкових експериментальних етапів до глобальних високошвидкісних мереж сьогодні є прикладом вражаючого технологічного прогресу та інновацій. Разом із тим, розвиток стільникових мереж супроводжувався численними технічними, соціальними та економічними викликами, які потребували значних зусиль для подолання.

Основна проблема, яку порушує ця стаття, полягає в необхідності комплексного аналізу історії розвитку стільникових мереж, зокрема технічні труднощі, соціальні та економічні наслідки, проблеми приватності та безпеки, а також енергетичні та екологічні проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження та публікації з історії розвитку стільникових мереж зв'язку дозволяють окреслити ключові моменти еволюції цієї технології, а також розглянути новітні дослідження та тен-

денції, які визначають напрямок розвитку телекомунікаційної інфраструктури.

Серед провідних фахівців у галузі бездротових комунікацій та мобільних мереж можна виділити Андрею Голдсмит [1], яка зробила великий внесок у розвиток теорії мобільних мереж та мультиантенних систем (MIMO), а також у питаннях управління частотами для мереж 4G і 5G, Теодора Раппапорта [2], який одним із перших, хто почав досліджувати питання використання міліметрових хвиль в стільникових мережах нового покоління (5G) та багато інших.

У той же час, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, наукові роботи провідних науковців продовжують формувати теоретичні та практичні аспекти сучасних комунікаційних систем.

Постановка завдання. Метою даної статті є дослідження етапів розвитку стільникових мереж зв'язку, починаючи з перших технологій мобільного зв'язку до сучасних та майбутніх інновацій, таких як 5G і 6G. Окрему увагу приділити технологічним, соціальним та економічним змінам, що виникли в результаті розвитку цих мереж,

а також їх впливу на глобальні комунікаційні системи, бізнес та повсякденне життя користувачів.

Виклад основного матеріалу. Перше покоління зв'язку 1G почало розгортатися у 1979 році в Японії. Це був аналоговий низькочастотний сигнал, який був схильний до перешкод і спотворень, тому якість звуку була досить низькою. Було невелике покриття без роумінгу між операторами і тим більше між країнами, тому що в різних країнах були свої стандарти зв'язку. 1G було першим поколінням бездротового зв'язку, в першу чергу, орієнтованим на голосові послуги. Воно працювало на аналогових сигналах, які мали обмеження щодо якості та безпеки. Проте свого часу воно було революційним.

Концепція архітектури мереж залишається незмінною до п'ятого покоління. Розглянемо, які основні компоненти є в мобільних мережах. При здійсненні дзвінка сигнал надходить з мобільного пристрою на базову станцію. Базова станція, перенаправляє сигнал у ядро мережі, яке у першому поколінні називалось Mobile telephone switching office (комутатор мобільного зв'язку). Вона виконувала досить примітивну функцію, а саме комутувала сигнал або на іншу базову станцію, або на телефонні стаціонарні проводові лінії зв'язку.

Розглянемо основні проблеми першого покоління:

- відсутність захисту даних. Мережа не мала шифрування, тобто зловмисник із примітивним перехоплювачем радіоефіру міг почути розмови абонентів на певній частоті. Канал між базовою станцією та мережею оператора також не був захищений, зловмисник міг туди спокійно втрутитись та перехопити сигнал;

- відсутність автентифікації у мережі. Зловмисник міг використовувати ідентифікаційні номери абонента та отримати доступ до послуг оператора мобільного зв'язку. З доступом він міг зробити цільову атаку – телефонувати іншим абонентам з шахрайською метою;

- доступність. Технологія, з допомогою якої виділялися канали абонентів, була примітивна. Весь частотний діапазон поділявся на невеликі піддіапазони, які виділялись абонентам. Цих піддіапазонів була зовсім невелика кількість, і зловмисник, надсилаючи запити на відкриття каналу, міг переважати базову станцію так, що офіційним абонентам надати послуги зв'язку вона вже не могла.

На початку 90-х років користувачів мережі 1G було вже близько 20 мільйонів, що обіцяло великий комерційний успіх. Оператори зв'язку

почали покращувати технології мобільних мереж. Так виникли мережі другого покоління 2G. Вони почали розгортатися в 1991 році у Фінляндії. Другим поколінням вважаються стандарти GSM/GPRS та EDGE, це вже цифровий зв'язок. З'явилися SMS, MMS, а разом із GPRS-стандартом з'явився доступ до мережі Інтернет.

Розглянемо, як змінилась архітектура мережі. По-перше, з'явився контролер базових станцій, який виділяв канали під користувачів та виконував Handover. Handover – це процес передачі обслуговування абонента від однієї базової станції до іншої під час виклику або сеансу передачі даних, наприклад, під час руху абонента.

Потім з'явився Mobile Switching Center (центр комутації мобільного зв'язку). Цей комутатор переправляє сигнали до зовнішніх мереж комутації даних: іншим операторам або на телефонні стаціонарні проводові лінії зв'язку.

Також додали компонент Authentication Center (центр автентифікації). З назви зрозуміло, що у мережі GSM з'явилася автентифікація. Вона ґрунтувалася на тому, що оператор у своєму центрі прописував ідентифікатор абонента та пов'язаний із ним закритий ключ. Ці дані, записувалися на SIM-картки (Subscriber Identification Module – модуль ідентифікації абонента), які також з'явилися у другому поколінні зв'язку.

Незважаючи на велику турботу про безпеку в мережах другого покоління, ризики залишалися. Наприклад, після автентифікації в мережі оператора абонент генерував ключ шифрування за алгоритмом A8, який потім використовувався для шифрування даних в радіоканалі за допомогою алгоритму A5. Проблемаю стало те, що шифрування було обмежене лише базовою станцією. Все, що йшло далі від базової станції до мережі оператора, не шифрувалося. Зловмисник все ще міг втрутитися в канал і перехопити всі дані, що передаються.

До початку 2004 року пристроїв, які використовують мережу другого покоління, було більше одного мільярда. Це дало ще один поштовх розвитку мереж мобільного зв'язку. Було створено консорціум 3GPP (3rd Generation Partnership Project) для стандартизації зв'язку мереж третього покоління, які почали розгортатися на початку XXI сторіччя.

Головним принципом у проектуванні мережі третього покоління стала зворотна сумісність з 2G, таким чином опорна мережа була повністю заснована на мережі 2G з деякими покращеннями. У мережі радіодоступу для виділення раді-

оканалів для абонентів почали використовувати технологію Code-Division Multiple Access (множинний доступ із кодовим поділом), яка дозволила мінімізувати атаки на доступність базової станції. При кодовому розділенні зникло обмеження кількості каналів, але виникла інша проблема – зі збільшенням числа абонентів зростала ймовірність помилки декодування. Це призвело до погіршення зв'язку, але не біло відмови в обслуговуванні.

Архітектура мережі мало змінилася. Ще у другому поколінні з'явилася мережа GPRS, яка надала доступ абонентів до інтернету. Лише у підмережі радіодоступу змінилися назви компонентів та її функціональність. Завдяки цьому 3G-мережі змогли надати вищу швидкість підключення абонентів та якісніші послуги зв'язку.

Усі впроваджені концепції безпеки залишаються актуальними й у наступних поколіннях зв'язку, але допрацьовуються і поліпшуються. Так, в алгоритмі автентифікації відбулося доповнення, абонентський пристрій також автентифікував мережу оператора, тобто з'явилася двостороння автентифікація. Автентифікаційний центр вже не за допомогою алгоритмів A3, A5, A8, а за допомогою інших способів шифрування генерував автентифікаційний вектор і направляв його мобільному пристрою. Пристрій, у свою чергу, за допомогою криптофункцій генерував очікуваний автентифікаційний код і порівнював його з кодом, який надійшов від автентифікаційного центру. Якщо код не збігається, то мережа не знає закритий ключ, можливо зловмисник намагається провести атаку Fake BTS. Якщо коди збігаються, мережа знає закритий ключ, і їй можна довіряти.

Шифрування та захист цілісності забезпечувалися алгоритмом KASUMI, який згодом виявився не достатньо «криптостійким». Йому на заміну прийшов алгоритм SNOW3G, який досі використовується в мережах LTE. Внутрішні атаки залишалися актуальними, тому що всередині мережі оператора, на каналах між контролером радіомережі та іншими компонентами захисту не було.

Також консорціум запропонував використовувати IPsec на з'єднанні між GPRS із мережею оператора та зовнішніми інтернет-провайдерами для забезпечення взаємної автентифікації та шифрування даних, але остаточне рішення про використання IPsec залишалося на операторі. IPsec – це набір протоколів для забезпечення захисту даних, що передаються міжмережним протоколом IP. Він дозволяє здійснювати підтвердження автентичності, перевірку цілісності та/або шифрування

IP-пакетів. IPsec також включає протоколи для захищеного обміну ключами в мережі Інтернет. Однак підключення до мереж комутації даних інших операторів продовжувало ґрунтуватися на SS7-протоколах, тому загрози, пов'язані з SS7-мережами, залишилися актуальними і в 3G.

Мережі четвертого покоління почали розгортатися наприкінці 2000-х років. Сьогодні LTE – найпопулярніший стандарт зв'язку. Він повністю побудований на IP-мережах. В них інформація відправляється на інші мережі за допомогою технології Voice-over-LTE. VoLTE має втричі більше голосову ємність та ємність даних, ніж мережі 3G і до шести разів більше, ніж мережі 2G. Протокол SS7 нарешті замінили на протокол Diameter, який забезпечує захист даних у мережі.

Архітектура мережі досить сильно змінилася. З'явився канал між базовими станціями, а також між базовою станцією та мережею оператора. Виключили контролер базових станцій – його функціональність розподілилася між базовою станцією та опорною мережею. Залишився лише один вихід до зовнішніх мереж, тому що тепер вони засновані тільки на IP-пакетах. Так як 4G мережі засновані на пакетній передачі даних, комутаційні канали до інших операторів замінили IP-канали, що дозволило організувати один вихід до всіх зовнішніх мереж.

Відбулися й зміни захисту даних. Тепер між мережею оператора та мобільним пристроєм генерується цілих п'ять ключів: два – для захисту контрольних даних від мережі оператора, два – для захисту контрольних даних від базової станції та один – для шифрування даних між мобільним пристроєм та базовою станцією.

Алгоритми захисту в 4G – SNOW3G, AES та ZUC. Криптоалгоритм AES є світовим стандартом симетричного шифрування та широко використовується для вирішення практичних завдань захисту даних. Його використання підвищило безпеку мобільних мереж четвертого покоління, і зараз це найпоширеніший алгоритм захисту та шифрування трафіку в мобільних мережах.

Також використовується протокол IPsec на з'єднанні між базовими станціями та базовою станцією з мережею оператора для взаємної автентифікації та захисту даних. 3GPP запропонували вимоги для захисту базової станції, так званого захищеного середовища базової станції. Але ці вимоги описані досить загально, і тому реалізація залишається на плечах мобільного оператора, що може додавати певні ризики, вразливості у реалізації кожного їх.

Незважаючи на рівень безпеки, що значно зріс, зловмисники знайшли спосіб експлуатувати вразливості мереж старих поколінь – через даунгрейд. Принцип атаки полягає в тому, що пристрій постійно відправляє на базову станцію *measurement reports* – звіти про те, яку якість зв'язку вона отримує зараз. Зловмисник може від імені жертви надіслати повідомлення про поганий зв'язок. В такому випадку базова станція автоматично перепідключає абонента до мережі нижчого покоління. Тепер зловмисник може використати вразливість цього покоління для атаки на абонента.

Атаку через даунгрейд важко реалізувати, оскільки вона орієнтована на певного абонента. Вибір жертви – лише початок атаки. Далі потрібно реалізувати загрози того покоління, на яке переключився абонент, при тому, що багато загроз оператори вже можуть контролювати. У зв'язку з цим даунгрейд – це рідкісна та непроста атака.

Мережі п'ятого покоління почали розгортати на початку 2010-х років. Вони засновані на мікросервісній архітектурі, віртуалізації та створені для розгортання у хмарній інфраструктурі.

Ядро мережі змінилося. Кожна функція мережі виконує певну функцію. Наприклад, AMF (*Action Message Format* – формат обміну даними) управляє функціями доступу абонентів до мережі та їх мобільності, при цьому делегує функції керування сеансами користувачів та потоками даних у мережі компоненту SMF (*Service Management Facility*), функції дотримання мережевих політик та угод про рівень обслуговування – PCF (*Policy Control Function*), а автентифікацію абонентів покладено на компонент AUSF (*Authentication Server Function*).

Базову станцію за специфікацією OpenRAN розділили на три складові:

- Radio Unit, який приймає сигнал від мобільних пристроїв,
- Distributed Unit (DU), основний процесорний блок, який обробляє дані у стеку протоколів,
- Central Unit (CU), який керує потоком даних у мережі та визначає, як пакети проходять через інфраструктуру.

Розглянемо найбільш помітні відмінності від 4G-мережі:

Вищі швидкості. 5G забезпечує пікову швидкість передачі даних до 100 разів вище, ніж 4G, що дозволяє транслювати відео надвисокої чіткості та швидше завантажувати файли. Однак для досягнення цих швидкостей потрібні правильні умови (відсутність перешкод). Під час перших

тестів Vodafone в Україні було досягнуто пропускну спроможність прийому даних 1508 Мбіт/с, що в 3 рази більше теоретичного максимуму 4G і до 5 разів швидше за його практичні показники.

Низька затримка. Мережі 5G мають значно меншу затримку, скорочуючи затримку передачі майже до реального часу, що має вирішальне значення для таких додатків, як автономні транспортні засоби і віртуальна реальність. Але для цього потрібна велика інфраструктура.

Збільшення пропускну здатності. Завдяки покращеному мобільному широкосмуговому зв'язку 5G підтримує більше пристроїв у заданій області, пристосовуючись до зростаючої кількості підключених пристроїв у розумних містах та будинках. Однак це також залежить від пропускну спроможності мережі.

Розділення мережі. 5G дозволяє створювати приватні мережі з індивідуальними послугами, оптимізуючи пропускну спроможність мережі для конкретних випадків використання, наприклад для аварійно-рятувальних служб або промислової автоматизації.

Хоча мережі 5G пропонують безліч переваг, вони також мають численні проблеми. Розглянемо основні з них:

– деякі люди висловили стурбованість щодо потенційного впливу випромінювання 5G на здоров'я, особливо при використанні високочастотних діапазонів. Хоча дослідження не знайшли переконливих доказів шкоди, необхідні постійні дослідження, щоб гарантувати безпеку мереж 5G. Однак суспільне сприйняття, як і раніше, залишається проблемою;

– розгортання мереж 5G вимагає значних інвестицій в інфраструктуру, що може виснажити бюджети операторів мобільного зв'язку та призвести до вищих витрат споживачів. Крім того, перехід на 5G може порушити роботу галузей, які покладаються на старі технології, що призведе до втрати робочих місць та економічних проблем. Однак зрештою очікується, що довгострокові вигоди переважать ці короткострокові наслідки;

– розширення можливостей підключення та збору даних, що забезпечується 5G, може призвести до проблем конфіденційності, особливо якщо персональні дані не захищені належним чином. Використання 5G у розумних містах та додатках IoT потребуватиме надійних заходів захисту конфіденційності для запобігання неправомірному використанню даних. Однак забезпечення дотримання цих заходів захисту буде складним завданням;

– щоб повною мірою скористатися перевагами 5G для бізнесу, багатьом підприємствам потрібно буде повністю переоснастити свою телекомунікаційну інфраструктуру. Це включає закупівлю нового обладнання, модернізацію технологічних процесів, відкриття нових ліцензій, поповнення команди галузевими фахівцями, надання послуг;

– оскільки специфікація 5G вимагає вищих частот, мережа має обмежений радіус дії. Дерева та високі будівлі перешкоджають поширенню хвиль, тому для досягнення великого покриття потрібно більше вишок стільникового зв'язку. Для збільшення пропускної здатності та покращення сигналу необхідно встановити датчики та додаткові антени на будівлях та вуличних об'єктах;

– при підключенні до 5G акумулятор будь-якого пристрою зношується швидше. Чим потужніша мережа, тим сильніше вона впливає на акумулятор і послаблює пристрій. Оскільки дослідження та розробки в області 5G продовжуються, вироб-

ники також шукають нові способи підвищення продуктивності багаторазових джерел живлення.

Висновки. Останні публікації з історії розвитку стільникових мереж зв'язку свідчать про швидкий прогрес у галузі, що охоплює нові технології, підвищену безпеку, зростаючі вимоги до якості послуг і здатність мереж підтримувати мільярди пристроїв в рамках Інтернету речей. Стільникові технології продовжують змінювати наше життя, забезпечуючи нові можливості в комунікаціях, бізнесі та повсякденному житті, одночасно ставлячи нові виклики щодо енергозбереження, безпеки та приватності користувачів. Історія розвитку стільникових мереж є не лише історією технологічних інновацій, але й свідченням їхнього глибокого впливу на соціальну та економічну структуру суспільства. Розуміння цих процесів є важливим для прогнозування майбутніх тенденцій та подальшого вдосконалення мобільних технологій.

Список літератури:

1. Andrea Goldsmith «Wireless Communications», Cambridge University Press, 2005, 644 p.
2. Theodore S. Rappaport «Wireless Communications: Principles And Practice», Pearson Education, 2010, 709 p.
3. David Tse, Pramod Viswanath «Fundamentals of wireless communication», Cambridge University Press, 2005, 564 p.
4. Ke-Lin Du, M. N. S. Swamy «Wireless Communication Systems. From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies», Cambridge University Press, 2010, 985 p.

Haryst A.V. HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF CELLULAR COMMUNICATION NETWORKS

The cellular network allows modern mobile devices not only to make calls, but also to send messages and connect to the worldwide Internet. Not so long ago, four generations of networks were known to the global telecommunications industry: 1G, 2G, 3G and 4G (LTE). However, the global telecommunications industry is currently actively implementing 5G technology. It is the latest standard developed for broadband wireless digital communications.

The article examines the history of the development of cellular networks, how four generations of mobile communication networks have changed over 40 years. If the networks of the first generation 1G disappeared long ago, then the 2G, 3G and 4G networks are still in use. Moreover, several legacy infrastructures of 3G and 4G networks will organically become part of the fifth generation 5G mobile networks.

The article explains how 5G technology differs from previous generations, how it works, what advantages it has, and what difficulties you have to face during its implementation.

The paper identifies that the demand for Internet access combined with the emergence of new technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things (IoT) and automation is driving a significant increase in the amount of data that is growing exponentially. Modern mobile infrastructure was not designed for such an information load and needs to be updated.

The paper reveals that with its high speed, high bandwidth and low latency, 5G technology can help support and scale some applications, such as traffic control of cloud storage connections, drone delivery, video chat and game streaming. The applications of 5G technology are limitless, ranging from global payments and emergency response to distance learning.

Key words: cellular network, authentication, subscriber, switch, identifier, encryption, base station.

Зимовченко В.О.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОЇ ЗАРЯДКИ. ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА МАЙБУТНЄ

Сучасний світ важко уявити без технологій, які полегшують наше повсякденне життя. Смартфони, смартгодинники та бездротові навушники, електромобілі та складні медичні пристрої – усі ці винаходи формують наш побут, та вимагають нових підходів до їх заряджання. Бездротова зарядка, є однією з таких інновацій. Завдяки цьому винаходу, ми можемо полегшити наше життя відмовившись від численних кабелів зарядки різного типу, зламані роз'єми та залежність від постійного підключення до мережі за допомогою кабелю, більше не будуть турбувати.

Технології передачі бездротової енергії, ґрунтуються на принципах електромагнітної індукції, резонансної індукції або навіть передачі енергії через радіохвилі, активно почали впроваджуватися у повсякденне життя лише в останні десятиліття. Але ідея цієї технології зародилася значно раніше. Ще в XIX столітті Майкл Фарадей відкрив явище електромагнітної індукції, а Нікола Тесла мріяв про передачу енергії через повітря, використовуючи високочастотні поля. На сьогодні, ці наукові ідеї перетворилися у зручні пристрої, що заряджають смартфони, автомобілі й навіть медичне обладнання без потреби підключенню по кабелю.

Використання бездротової зарядки для смартфона не є чимось унікальним. Чудовим прикладом інновації і задумок інженерів є впровадження бездротової зарядки у транспорті, де зарядка електромобілів або іншої колісної електротехніки більше не потребує обов'язкового підключення за допомогою кабелю. На ринку все більше з'являється альтернатив з вже вбудованою технологією бездротової зарядки, насамперед це дрони, автономні роботи, та побутова техніка що потребує мобільності. Водночас у побуті з'являються меблі, з вже інтегрованими зарядними станціями, що додає більше комфорту та зручності до нашого життя.

Технології бездротової зарядки – це не лише технологічний прорив, а й символ змін, що відбуваються у нашому світі. Вони нагадують, що майбутнє може бути простішим та зручнішим. Але інженерам ще потрібно буде попрацювати над питанням ефективності та втратою енергії при заряджанні. Проблеми перегріву та тривалого часу зарядки також вимагають вирішення.

В статті аналізуються ключові аспекти бездротової зарядки: принципи її роботи, сучасні стандарти, переваги та недоліки, а також можливості її застосування у різних сферах життя. Детально проаналізовано технології, які вже змінюють наше життя, спробуємо поглянути у майбутнє, де бездротова енергія стане невід'ємною частиною життя та побуту людини.

Ключові слова: бездротова зарядка, радіочастотна передача, резонансна індукція, електроніка, електротранспорт, Qi, зарядна станція, пристрій.

Постановка проблеми. Бездротові зарядки стають все більш популярними завдяки зручності використання та їхньому впливу на дизайн пристроїв. Проте, незважаючи на значний прогрес у цій сфері, технологія має ряд викликів, які обмежують її впровадження.

Перш за все, це проблема низької ефективності. У бездротових зарядках частина енергії втрачається у вигляді тепла, що призводить до меншої продуктивності порівняно з традиційними дротовими зарядками. Це особливо критично для пристроїв із великими енергетичними потребами, такими як електромобілі, де втрати енергії можуть бути значними.

Другий аспект – це тривалий час зарядки. Бездротові зарядки часто працюють повільніше, ніж їхні дротові аналоги, що зменшує їхню привабливість для користувачів, для яких швидкість і доступність на першому місці.

По третє, це обмеження у відстані та просторі передачі енергії. Поточні технології вимагають точного позиціонування пристрою на зарядній станції або перебування в зоні дії магнітного поля. Це створює незручності, які суперечать самій ідеї гнучкого використання бездротової енергії.

Також виникають питання щодо перегріву, особливо під час використання пристроїв із високою потужністю зарядки. Це може не лише впливати на

тривалість роботи акумуляторів, але й викликати занепокоєння щодо безпеки технології.

Окрім технічних аспектів, важливим викликом є стандартизація. Різні виробники використовують власні методи зарядки, що створює проблеми сумісності між пристроями. Наприклад, гаджети з підтримкою стандарту Qi не завжди працюють із зарядними станціями інших стандартів.

Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, щоб бездротові зарядки могли не лише конкурувати з дротовими, але й перевершувати їх за всіма параметрами. Розвиток цієї технології залежить від подальших досліджень, удосконалення матеріалів, підвищення ефективності передачі енергії та створення універсальних стандартів, які забезпечать широку доступність і взаємодію пристроїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у сфері бездротового заряджання висвітлює низку перспективних напрямків і викликів. Зокрема, науковці активно досліджують ефективність передачі енергії на різних дистанціях, розвиток інфраструктури для електромобілів та вдосконалення динамічного заряджання.

Ефективність передачі енергії. Дослідження що проводилися в університеті Аалто (*Aalto University*), що у Фінляндії, досягли ефективності понад 80% при передачі енергії на відстані до 18 см. Це значне досягнення для подолання проблем втрат енергії, які традиційно зростають зі збільшенням дистанції при передачі. Такий прорив може покращити автономність пристроїв та електромобілів, роблячи їх більш практичними [1].

Динамічне заряджання транспортних засобів. У Технологічному університеті Делфта (*Delft University of Technology*) активно досліджується концепція заряджання електромобілів під час руху. Основна увага приділяється оптимізації процесу заряджання, розпізнаванню сторонніх предметів у зоні заряджання та зменшенню втрат енергії. Цей напрямок дозволить створювати інтелектуальні дороги, де електромобілі зможуть заряджатися без зупинок [2].

Системи й технології [3]. У наукових публікаціях активно розглядаються різні методи передачі енергії, такі як індуктивне, магнітно-резонансне та навіть мікрохвильове заряджання. Сучасні дослідження акцентують увагу на створенні універсальних стандартів та сумісних рішень для інтеграції технологій у різні галузі, включаючи побутову електроніку та транспорт.

Стандартизація та безпека. У роботах IEEE вказується на необхідність уніфікації зарядних

платформ для різних типів пристроїв, що стимулюватиме ринок та зробить ці рішення більш доступними [3, 4]. Подальші розробки мають потенціал стати рушійною силою розвитку електромобілів, портативних пристроїв і навіть розумних міст.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз сучасного стану бездротових технологій, поглиблене дослідження переваг та викликів, її вплив на різні галузі та майбутнє. Показати, як бездротові технології трансформують індустрію, від мобільних пристроїв до електротранспорту, а також які нові стандарти і технологічні розробки обіцяють зробити цю технологію більш доступною та ефективною.

Виклад основного матеріалу. *Принцип роботи електромагнітної індукції* полягає у створенні електричного струму в провіднику завдяки зміні магнітного потоку, що проходить через нього. Вперше це явище було відкрите Майклом Фарадеєм у 1831 році і є основою роботи багатьох електротехнічних пристроїв, таких як трансформатори, генератори та індукційні двигуни.

В сучасних бездротових зарядних пристроях які ми використовуємо в повсякденному житті принцип роботи базується на передачі енергії між двома котушками через змінне магнітне поле. Працює це наступним чином:

1. Через *катушку що передає* (у зарядному пристрої) проходить змінний електричний струм, що створює змінне магнітне поле навколо цієї ж катушки.

2. У пристрої що заряджається (наприклад, смартфоні), є *приймальна катушка*. Як тільки вона опиняється в зоні дії змінного магнітного поля, у катушці індуктується змінний струм.

3. Індукований змінний струм у *приймальній катушці* перетворюється в постійний за допомогою випрямляча. Після чого, цей струм використовується для зарядки батареї пристрою.

Можна виділити кілька особливостей в роботі такої зарядної станції:

Ефективність. Відстань між катушками впливає на ефективність передачі енергії. Зазвичай це кілька міліметрів.

Резонансна індукція. Для підвищення ефективності обидві катушки налаштовуються на одну і ту ж саму резонансну частоту.

Безконтактність. Фізичний контакт між пристроєм і зарядкою не є обов'язковим.

З прикладів де саме застосовується, можна виділити бездротові зарядні станції для телефонів (*Qi-стандарт*), медичні імпланти з індуктивною зарядкою, та зарядні станції для електромобілів.

Принцип роботи резонансної індукції в зарядних пристроях заснований на передачі енергії між двома котушками, налаштованими на одну і ту ж резонансну частоту. Це дозволяє ефективно передавати енергію навіть на більших відстанях у порівнянні з традиційною електромагнітною індукцією.

Це працює наступним чином:

1. Змінний генератор, що підключений до *передавальної котушки* створює змінний струм на резонансній частоті котушки. Це генерує змінне магнітне поле.

2. *Приймальна котушка налаштована* на ту ж саму резонансну частоту, що і передавальна. Коли котушка опиняється в зоні дії магнітного поля, у ній виникає індукований струм.

3. Резонансна індукція забезпечує підсилення енергії, яка передається від *передавальної до приймальної котушки*. Це досягається завдяки тому, що резонансні контури мінімізують втрати енергії.

4. Індукований змінний струм у приймальній котушці перетворюється в постійний за допомогою *випрямляча*, і цей струм заряджає акумулятор пристрою.

Особливостями даного принципу є:

Більша відстань передачі енергії. Резонансна індукція працює на більших відстанях порівняно зі звичайною індукцією (кілька десятків сантиметрів).

Більша ефективність. Налаштування обох котушок на одну і ту ж саму частоту зменшує втрати енергії.

Резонансна індукція демонструє перспективи розвитку бездротової передачі енергії, роблячи її зручнішою та ефективнішою, тому знайшла своє місце в бездротових зарядних станціях для електротранспорту, медицині та портативній електроніці.

Принцип роботи радіочастотної передачі енергії (РЧПЕ) в зарядних пристроях побудований на використанні електромагнітних хвиль у радіочастотному діапазоні для бездротової передачі енергії від передавача до приймача. Це дозволяє заряджати пристрої на значній відстані порівняно з індуктивною або резонансною зарядкою. Не дивлячись на те, що найбільш відомими технологіями бездротової зарядки є системи на основі індукції, технологія радіочастотної передачі енергії має кілька унікальних переваг та можливостей

Принцип роботи радіочастотної передачі:

1. Передавач генерує радіочастотні хвилі в певному діапазоні (915 МГц або 2.4 ГГц), які потім спрямовуються на приймач в пристрої.

2. Вбудований приймач у пристрої, захоплює ці хвилі за допомогою антен, після чого радіохвилі за допомогою випрямляча перетворюються назад в електричну енергію, яка заряджає акумулятор пристрою.

Особливості та переваги:

Зарядка на відстані. РЧПЕ дозволяє заряджати пристрої на відстані від кількох сантиметрів до кількох метрів. Це робить зарядні пристрої більш універсальними.

Мультифункціональність. Можливість заряджати не один, а декілька пристроїв одночасно в зоні дії передавача.

Гнучкість в розташуванні. Як приймач так і передавач не потребують точного розташування в просторі.

Радіочастотна передача є перспективною технологією, яка розширює можливості бездротової зарядки та робить її більш універсальною, але в той же час вона має і недоліки:

Низька ефективність на великих відстанях через розсіювання радіохвиль.

Обмеження потужності звужує коло пристроїв які мають низьке енергоспоживання.

Використання радіохвиль потребує дотримання норм щодо впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я людини. Не зважаючи на перспективність даної технології, на сьогодні *масового* її використання для зарядки пристроїв не виявлено.

Лазерна та інфрачервона передача енергії, використовуються для бездротового заряджання електронних пристроїв, і обидві технології ґрунтуються на використанні електромагнітного випромінювання

Система лазерної зарядки, розроблена в Університеті Седжонг, Південна Корея, використовує інфрачервоний лазер для передачі енергії на відстань до 30 метрів. Вона складається з передавача та приймача, які створюють резонатор у вільному просторі, що дозволяє ефективно передавати енергію малим пристроям, таким як датчики або *IoT-гаджети*. Система автоматично блокує лазерний промінь у разі перешкоди, тим самим забезпечуючи безпеку.

Технологія лазерної передачі енергії передбачає використання когерентного лазерного випромінювання для передачі енергії на відстань. Її принцип роботи виглядає наступним чином:

1. *Джерело енергії.* Електрична енергія конвертується в лазерний промінь із певною довжиною хвилі (зазвичай у видимому або ближньому інфрачервоному спектрі).

2. *Передача енергії.* Лазерний промінь спрямовується на приймач, який розташований на зарядному пристрої або пристрої, що заряджається.

3. *Приймач енергії.* На пристрої, що заряджається, встановлюється фотодіод або інша фотоелектрична матриця, яка перетворює лазерне світло назад в електричну енергію.

4. *Зарядження.* Конвертована енергія використовується для зарядження акумулятора пристрою.

Особливостями даного методу є висока ефективність на коротких відстанях. Але при цьому, повинна зберігатись пряма видимість між передавачем і приймачем, оскільки лазерний промінь не може огинати перешкоди. Питання безпеки вимагає заходів для уникнення потенційної шкоди, яку може спричинити лазерний промінь для очей або шкіри.

Технологія інфрачервоної передачі енергії ґрунтується на використанні інфрачервоного (ІЧ) випромінювання з довжиною хвилі 700–1000 нм, що належить до невидимого спектра, для бездротового перенесення енергії. Її принцип роботи виглядає наступним чином:

1. *Джерело енергії:* ІЧ-світлодіоди випромінюють ІЧ-хвилі.

2. *Передача енергії:* Інфрачервоне випромінювання спрямовується до приймача, розташованого на пристрої.

3. *Приймач енергії:* Фотоелектричний приймач (подібний до сонячної панелі) перетворює інфрачервоні хвилі на електричну енергію.

4. *Зарядження:* Електроенергія, отримана в результаті конвертації, використовується для зарядження акумуляторів пристрою.

Особливостями даного методу є менша потужність, ніж у лазерної. Також не потрібно прямої видимості, оскільки ІЧ-хвилі можуть частково проникати через деякі матеріали. Технологія безпечніша за лазерну, оскільки ІЧ-випромінювання має нижчу інтенсивність.

Обидві технології мають свої переваги й обмеження, і вибір залежить від конкретного застосування. Лазерна передача підходить для високотужних задач із прямою видимістю, тоді як інфрачервона – для низькопотужних і безпечніших рішень.

Технології Qi, AirFuel Alliance, Proprietary Standards та Tesla Wireless Charging Platform.

Технологія Qi є глобальним стандартом бездротової зарядки, розробленим *Wireless Power Consortium* [5]. Ця технологія використовує електромагнітну індукцію для передачі енергії між зарядною станцією і пристроєм. Вона функціонує на частоті від 100 до 205 кГц, і забезпечує потуж-

ність від 5 до 15 Вт, хоча нова версія *Qi2* підтримує швидші режими зарядки до 15 Вт і сумісність з магнітними аксесуарами, як *MagSafe* від *Apple*. *Qi* є одним із найпоширеніших стандартів, який підтримують понад 3700 сертифікованих пристроїв, включаючи смартфони, навушники та інші гаджети. Технологія також забезпечує адаптивну зарядку, покращене управління теплом і захист від сторонніх об'єктів, що підвищує її безпеку та ефективність.

Технологія AirFuel Alliance пропонує два основні стандарти: *AirFuel Inductive* (раніше відома як *PMA*) та *AirFuel Resonant* [6, 7]:

AirFuel Inductive використовує індуктивну зарядку на частоті від 277 до 357 кГц, забезпечуючи її використання на невеликих відстанях з підтримкою декількох пристроїв одночасно.

AirFuel Resonant базується на магнітному резонансі, дозволяючи заряджати пристрої з більшою свободою позиціонування і на більшій відстані (до 50 мм). Ця технологія підходить для гаджетів різної потужності (від смартфонів до роботів), забезпечує швидкість зарядки, аналогічну провідній, та є ефективною для комерційних і домашніх застосувань.

Proprietary Standards. Виробники на кшталт *Apple*, *Samsung* або *Xiaomi* розробляють власні стандарти бездротової зарядки, оптимізовані для їхніх екосистем [8]. Для прикладу, *MagSafe* від *Apple* базується на *Qi* з додатковою магнітною підтримкою для точного позиціонування пристроїв на зарядній станції. Максимальна потужність зарядки від *Apple* – 15 Вт. Вона не є універсальною, і підходить тільки для iPhone.

Xiaomi активно досліджує інноваційні технології у сфері бездротової зарядки. Основним проривом може стати їх технологія *Mi Air Charge*, яка забезпечує дистанційну зарядку пристроїв на відстані. Ключовими аспектами цієї технології є система зарядної станції з 144 антенами, які створюють вузькоспрямовані міліметрові хвилі, передаючи енергію на пристрій. В свою чергу пристрій оснащений випрямлячем з антеною приймає її, та конвертує цю енергію в електричний струм.

Технологія дасть змогу заряджати пристрої на відстані декілька метрів з потужністю 5 Вт, без зниження ефективності, навіть якщо між пристроєм і зарядною станцією є перешкоди. Вона дасть змогу заряджати смартфони, смартгодинники, фітнес браслети, розумні колонки та інші *IoT-пристрої*.

Офіційної дати виходу зарядної станції компанії ще не оголосила.

Tesla Wireless Charging Platform – це інноваційний бездротовий зарядний пристрій, що використовує передові технології для зручного й ефективного заряджання декількох пристроїв одночасно [9]. Його дизайн та функціональність вирізняють його серед аналогів на ринку бездротових зарядних пристроїв. Технологія *FreePower* використовує 30 зарядних котушок, що дозволяє уникнути необхідності позиціонування пристрою на зарядній станції, підтримує одночасну зарядку до трьох пристроїв з потужністю 15 Вт, забезпечуючи при цьому динамічний розподіл енергії для кожного пристрою окремо. Виробником заявлено зменшення втрат енергії під час передачі енергії, що робить пристрій екологічним і менш схильним до перегрівання.

До переваг можна віднести відсутність точного позиціонування на зарядній станції, систему захисту виявлення сторонніх металевих об'єктів з автоматичним вимкненням зарядки для запобігання перегріванню, а також сумісність зі всіма пристроями, що підтримують стандарт *Qi*. Можна заряджати всю портативну електроніку.

Зарядну станцію можна використовувати як в горизонтальному, так і в вертикальному положенні.

Бездротова зарядка для електротранспорту.

Компанія Ілона Маска *Tesla* активно розвиває технологію бездротової зарядки для своїх електромобілів. Одна з останніх інновацій – система індуктивної зарядки, яка вже була анонсована для моделей, таких як *Tesla Cybercab*, що планується до запуску у 2026–2027 роках [10, 11]. Особливість *Cybercab* полягає в тому, що він не матиме порту зарядки та буде підтримувати лише бездротове заряджання. Компанія обіцяє ефективну зарядку понад 90% при швидкості до 25 кВт, що перевищує домашні зарядні станції, але поступається потужності *Tesla Supercharger* (до 250–350 кВт).

Tesla також придбала німецьку компанію *Wiferion*, яка спеціалізується на технологіях бездротової індуктивної зарядки для промислового використання, особливо для автономних транспортних систем (*AGV*), мобільних роботів (*AMR*) та інших логістичних рішень [12]. Їх система *etaLINK* забезпечує безконтактну передачу енергії з ефективністю до 93%, що значно покращує продуктивність і знижує час простою.

Автомобільна дорога, з динамічною зарядкою, яка дозволяє заряджати електромобілі під час руху. Це реалізується через індукційні котушки, інтегровані в дорожнє покриття. Такі проекти тестуються в Ізраїлі та Швеції. Це дозволить ско-

ротити кількість зарядних станцій, та сприятиме розвитку електромобільної промисловості.

WiTricity – провідна компанія в розробці бездротових зарядних технологій для електромобілів [13]. Заснована у 2007 році, компанія використовує магнітний резонанс для передачі енергії. Її флагманська система *WiTricity Halo* забезпечує зарядку з ефективністю до 90% навіть при певному зсуві між автомобілем і зарядною платформою. Технологія відповідає стандартам *SAE J2954* і підтримується багатьма автовиробниками. Компанія співпрацює з виробниками легкових автомобілів, комерційних транспортних засобів та індустріального обладнання. Вона також розробляє рішення для автобусів та іншої техніки, як у випадку з китайськими автономними електро міні бусами. *WiTricity* прагне зробити зарядку зручною, інтегруючи свої рішення в розумні міста.

Сфери застосування.

Бездротові зарядні станції активно впроваджуються у різних сферах завдяки своїм перевагам, таким як зручність, безпека та зменшення зношування роз'ємів. Розглянемо їх застосування в таких галузях як споживча електроніка, електротранспорт, медицина, промисловість та які вона має перспективи розвитку.

Бездротові зарядні станції в споживчій електроніці забезпечують зручність для кінцевого користувача. Технологія *Qi* стала стандартом для заряджання таких портативних пристроїв як смартфони, смартгодинники чи планшети. Комп'ютерна периферія також отримує можливість заряджати мишки і клавіатури не використовуючи кабелі. Компанія *IKEA* інтегрує зарядні станції в кухонні поверхні та лампи. Павербанки тепер підтримують бездротову передачу енергії, що забезпечує зручність як у щоденному використанні, так і під час подорожей. Зручність і доступність стають головною перевагою на користь бездротового з'єднання.

У сфері електротранспорту бездротові зарядки стають важливим компонентом майбутньої інфраструктури. Технології бездротового заряджання впроваджуються у громадські та приватні зарядні станції для автомобілів. Системи з індуктивною зарядкою, дозволяють заряджати авто, просто припаркувавши його поряд с такою станцією. Електробуси та тролейбуси обладнуються станціями для індуктивного заряджання на зупинках. Електросамокати, велосипеди та скутери можуть заряджатися за допомогою портативних бездротових станцій, як в домашніх умовах, так і на вулицях міста. Перевагами такої зарядки є безпека, змен-

шення необхідності ручного підключення кабелів, інтеграція в інфраструктуру міста.

У медицині бездротові зарядки вирішують проблему стерильності, безпеки, надійності та зменшенню хірургічного втручання. Кардіостимулятори чи слухові апарати, заряджаються через шкіру пацієнта, зменшуючи ризик потрапляння інфекцій. У промисловості бездротові зарядні станції підвищують ефективність роботи та знижують витрати на технічне обслуговування. Зарядка автономних роботів на виробництвах або складах, таких як *AGV (Automated Guided Vehicles)*, дозволяє мінімізувати зупинки у роботі. Інтеграція зарядних платформ у робочі поверхні для бездротового заряджання будівельного обладнання. Зарядка датчиків, камер, контролерів та інших пристроїв *IoT*. Перевагами використання бездротового заряджання в промисловості є стійкість до зношування, безпека у вибухонебезпечних середовищах, можливість автоматизації зарядного процесу.

Перспективами розвитку в перелічених вище галузях можна вважати збільшення ефективності та дальності бездротової передачі енергії, інтеграція з технологіями *Smart Grid* та *IoT*. Використання резонансної та магнітної індукції для великих потужностей. Розширення стандартизації для різних сфер застосування.

Переваги та недоліки використання бездротової зарядки.

Перевагами використання бездротової зарядки є зручність і універсальність у використанні. Завдяки стандарту *Qi*, портативні пристрої можна заряджати як разом, так і окремо на одній зарядній станції, а інтеграція в меблі, автомобілі та публічні місця, такі як кафе або заклади медицини зробить технологію ще більш привабливою.

Відсутність постійного підключення кабелів продовжує термін служби портів пристрою, та знижує ризики поломки кабелів та контактів. У майбутньому повна відмова від роз'ємів і кабелів на користь бездротових технологій дозволить зробити портативну електроніку ще більш захищеною від вологи та пилу.

Серед недоліків використання бездротової зарядки є втрата частини енергії під час самого процесу зарядки, що призводить до збільшення загального енергоспоживання для заряджання пристрою. Обмеження потужності, вона нижча ніж у сучасних швидкісних кабельних зарядках. Потреба у точному позиціонуванні для початку зарядки, та неможливість використання під час самої зарядки (електромагнітна або резонансна

індукція). Під час заряджання може спостерігатися нагрівання пристрою, що впливає на довговічність акумулятора. Необхідність дотримання суворих стандартів безпеки для уникнення перегрівання. Бездротові зарядки, інтегровані у меблі, не можна перенести в інше місце чи кімнату, а самі станції зазвичай дорожчі, ніж традиційні кабельні зарядки.

Перспективи розвитку.

Технології бездротової передачі енергії, такі як *Wi-Charge* та *Ossia (Cota)*, створюють революційний підхід до забезпечення пристроїв електроенергією. Ці технології працюють на основі передачі енергії через повітря, що дозволяє їх заряджати без прямого контакту або необхідності точного вирівнювання, як у традиційних бездротових зарядках.

Wi-Charge використовує інфрачервоні лазерні промені для передачі енергії на значні відстані, можна говорити про кілька метрів. Зарядні пристрої можуть бути інтегровані в світильники, меблі або стелі, забезпечуючи автоматичне заряджання пристроїв у зоні покриття. Це відкриває перспективи використання у «розумних будинках» та офісах.

Wi-Charge є ідеальним рішенням для пристроїв Інтернету речей (*IoT*), які часто розташовуються в важкодоступних місцях і потребують автономного джерела живлення, наприклад, датчики, камери спостереження, тощо. Лазерна технологія побудована з урахуванням вимог до безпеки для людей і домашніх тварин.

До перспектив розвитку можна віднести збільшення потужності без шкоди навколишньому середовищу, та вирішення питання з необхідністю прямих ліній між передавачем і пристроєм.

Ossia (Cota) використовує радіочастоти (*RF*) для передачі енергії, дозволяючи заряджати пристрої в межах зони дії передавача. Ця технологія має значні перспективи для розвитку завдяки своїй гнучкості. На відміну від *Wi-Charge*, *Cota* здатна передавати енергію навіть через перешкоди, такі як стіни, меблі або інші предмети, завдяки використанню радіохвиль.

Технологія дозволяє заряджати пристрої в радіусі до 10 метрів від передавача, створюючи зарядну зону в приміщенні з можливістю одночасного заряджання кількох пристроїв. Використання *Cota* ідеальна для великих об'єктів, таких як склади, фабрики або торговельні центри, де потрібно заряджати багато бездротових датчиків чи пристроїв. Застосування в розумних містах для живлення вуличних сенсорів, камер, рекламних дисплеїв тощо.

Для розвитку технології потрібно вирішити питання з низькою ефективністю передачі енергії на великі відстані. Обмеження щодо кількості пристроїв, які можуть заряджатися одночасно. Необхідність забезпечення суворим стандартам безпеки, задля збереженню життю і здоров'ю людині при роботі з технологією.

Сфери застосування обох технологій дуже широкі. Від портативної електроніки і *IoT*, до міського освітлення, камер спостереження, датчиків, сенсорів дронів та автоматизованих систем без зарядних станцій.

Технології *Wi-Charge* та *Ossia (Cota)* є перспективними рішеннями, які можуть суттєво змінити підхід до заряджання пристроїв. Їх розвиток сприятиме створенню більш гнучкої, бездротової екосистеми, зменшенню залежності від кабелів і роз'ємів та відкриє нові можливості в побуті, промисловості та інфраструктурі розумних міст. Однак для масового впровадження необхідно подолати виклики, пов'язані з ефективністю, безпекою та стандартизацією.

Висновки. Бездротові технології заряджання активно розвиваються та інтегруються в сучасне життя, забезпечуючи зручність і нові можливості для користувачів. Однак існують виклики, пов'язані з ефективністю, потужністю, безпекою

та стандартизацією, які потребують вирішення. У перспективі ці технології можуть стати стандартом для більшості пристроїв, значно змінюючи те, як ми користуємося електронікою в повсякденному житті.

Популярність бездротових зарядок пояснюється не лише їх зручністю, але й безпекою та універсальністю. Відсутність фізичних з'єднань мінімізує ризики короткого замикання, зношування контактів або потрапляння вологи в пристрій. Особливо важливим це стає у медицині, де герметичність і стерильність є ключовими вимогами до обладнання. Крім того, бездротова зарядка стала важливим елементом дизайну сучасних гаджетів, які тепер можуть бути водонепроникними та пилозахисними.

Однак, незважаючи на очевидні переваги, бездротова зарядка має й свої недоліки. Втрата енергії, менша ефективність у порівнянні з дротовими аналогами, а також необхідність розміщення пристрою у конкретній ділянці на зарядній станції змушують виробників не зупинятись на досягнутому. Нові стандарти, як-от *Qi2*, *AirFuel Alliance*, *Wi-Charge*, *Ossia (Cota)* та інші, вдосконалюють свої технології, забезпечуючи більшу потужність, підтримку більшої кількості сумісних пристроїв та навіть можливість зарядки на відстані.

Список літератури:

1. David Shiller «Researchers Achieve 80+% Efficiency For Long-Distance Wireless Charging»: сайт URL: <https://research.tudelft.nl/en/publications/dynamic-wireless-charging-of-electric-vehicles>
2. Mohammad Rabih, Maen Takruri, Mohammad Al-Hattab, Amal A. Alnuaimi, Mouza R. Bin Thaleth «Wireless Charging for Electric Vehicles: A Survey and Comprehensive Guide» сайт URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/15/3/118>
3. Aqueel Ahmad, Mohammad Saad Alam, Rakan Chabaan «A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles» сайт URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8101562>
4. Simon Hill «What Is Qi2? The Wireless Charging Standard Goes Magnetic» сайт URL: <https://www.wired.com/story/what-is-qi2-wireless-charging/>
5. «About AirFuel Alliance» сайт URL: <https://airfuel.org/faq/>
6. «Magnetic Resonance Charging Standard For Multi-Device Charging» сайт URL: <https://airfuel.org/airfuel-resonant/>
7. Doug Bonderud «How Wireless Charging Technology Works (Qi vs PMA), and How Businesses Can Use It» сайт URL: <https://biztechmagazine.com/article/2021/03/how-wireless-charging-technology-works-and-how-businesses-can-use-it-perfcon>
8. Julian Chokkattu «Review: Tesla Wireless Charging Platform» сайт URL: <https://www.wired.com/review/tesla-wireless-charger/>
9. Fred Lambert «Tesla releases closer look at its upcoming wireless EV charger» сайт URL: <https://electrek.co/2024/10/18/tesla-releases-closer-look-at-its-upcoming-wireless-ev-charger/>
10. Karan Singh «Tesla Shares Details of Its Upcoming Wireless Charger [VIDEO]» сайт URL: <https://www.notateslaapp.com/news/2331/tesla-shares-details-of-its-upcoming-wireless-charger-video>
11. «Industrial wireless charging & power solutions» сайт URL: <https://www.wiferion.com/us/>
12. Firas Navarro «WiTricity: Powering the Future of Electric Mobility with Wireless Charging» сайт URL: <https://evchargingmag.com/witricity-powering-the-future-of-electric-mobility-with-wireless-charging>

Zymovchenko V.O. WIRELESS CHARGING TECHNOLOGIES: EXPLORATION OF INNOVATIVE SOLUTIONS, OPERATING PRINCIPLES, AND FUTURE PROSPECTS

The modern world is hard to imagine without technologies that simplify our daily lives. Smartphones, smartwatches, wireless earbuds, electric vehicles, and advanced medical devices – all these inventions shape our routines and demand new approaches to charging. Wireless charging has emerged as one such innovation. This technology eliminates the need for numerous types of charging cables, worn-out connectors, and constant dependency on wired network connections, making everyday life more convenient.

Wireless energy transfer technologies, based on principles such as electromagnetic induction, resonant induction, or even energy transmission via radio waves, have only begun to be widely implemented in recent decades. However, the concept behind this technology dates back much further. In the 19th century, Michael Faraday discovered electromagnetic induction, and Nikola Tesla envisioned energy transmission through the air using high-frequency fields. Today, these scientific ideas have evolved into convenient devices that charge smartphones, vehicles, and even medical equipment without the need for physical connections.

Wireless charging for smartphones is no longer unique. A striking example of engineering ingenuity is the application of wireless charging in transportation, where electric vehicles and other wheeled technologies no longer require cables for charging. The market is witnessing a growing presence of devices with built-in wireless charging technologies, including drones, autonomous robots, and household appliances requiring mobility. Additionally, furniture with integrated charging stations is becoming increasingly common, adding comfort and convenience to daily life.

Wireless charging technologies represent not only a technological breakthrough but also a symbol of ongoing change in our world. They remind us that the future can be simpler and more convenient. Nevertheless, engineers must address challenges such as energy loss, efficiency, overheating, and long charging times.

This article analyzes the key aspects of wireless charging, including its operating principles, current standards, advantages, disadvantages, and applications across various fields. It provides an in-depth examination of technologies already transforming our lives and offers a glimpse into a future where wireless energy becomes an integral part of human life and everyday routines.

Key words: *wireless charging, radio-frequency energy transfer, resonant induction, electronics, electric transportation, Qi, charging station, device.*

UDC 004.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/19>

Ivanchuk O.V.

Kherson National Technical University

Kozel V.M.

Kherson National Technical University

Drozdova Ie.A.

Kherson National Technical University

Prykhodko O.O.

Kherson National Technical University

RESEARCH OF THE METHODS FOR OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN IEEE 802.15.4 PROTOCOLS

The paper investigates existing methods for optimizing energy consumption in IEEE 802.15.4 Internet of Things protocols. The following protocols were considered: ZigBee, 6LoWPAN, and WirelessHART. The ZigBee protocol has a sleep mode, frequency response control, transmitter power management, data aggregation and buffering, and transmission route optimization. 6LoWPAN uses sleep mode, frequency response control, IPv6 header compression, fragmentation and reassembly, and transmission route optimization. The WirelessHART protocol uses sleep and activation mode, frequency mesh, transmitter power management, data buffering and aggregation, transmission route optimization, and network topology management.

The study selected the criteria by which all optimization methods in IoT protocols are distributed: Device activity time management, Transmission frequency characteristics management, Transmitter power management, Data packet management, and Route management.

The ZigBee and Wireless HART protocols have optimization methods for all the proposed categories. The 6LoWPAN protocol has 4 categories of optimization methods, except for the Transmitter Power Management category.

The best energy efficiency indicators are found in the optimization methods of "Device activity time management" and "Route management." This is because devices are turned off when data is not needed to collect and transmit. Since devices can send data from other devices to the data center, the routing setting eliminates unnecessary data transfers and leaves the device in sleep mode longer instead of waiting for data from other devices to be sent. The worst-performing methods are those in the Transmission frequency management category because they are based on detecting transmissions that create collisions. Still, devices are in sleep mode most of the time, and their transmissions rarely overlap, so collisions are rare.

Key words: *Internet of Things, IEEE 802.15.4 standard, protocols, energy efficiency, optimization, devices.*

Problem statement. Extensive Internet of Things systems are built using protocols based on the IEEE 802.15.4 standard.

The IEEE 802.15.4 standard was specifically designed to design IoT systems because of its low power consumption, optimal data rate, and relatively long transmission distance [1]. Power consumption is still a significant concern for devices operating without replacing the power supply for years. Using the standard as a basis, separate protocols have been developed that implement their methods for optimizing energy consumption.

Analysis of recent research and publications. Paper [2] reviews publications on the energy efficiency of IoT protocols but does not specify

the specific optimization methods used to achieve energy efficiency or provide numerical values of the optimization efficiency.

Paper [3] investigates the impact of encryption methods on energy consumption. The results only allow for the choice of an encryption method for the operation of the Internet of Things protocol but do not allow for the analysis of the impact of optimization methods on the energy efficiency of protocols.

The aim of this work is to analyze existing Internet of Things protocols based on the IEEE 802.15.4 standard concerning the energy optimization methods available in them, to systematize them by category, and to determine their impact on the overall energy efficiency of the protocol.

Presentation of the main research material. The main protocols based on the IEEE 802.15.4 standard include ZigBee, 6LoWPAN, and WirelessHART.

ZigBee is a standard network protocol for Internet of Things devices supported exclusively by the ZigBee Alliance and uses the transport services of the IEEE802.15.4 network specification [4].

ZigBee energy optimization is performed in the following ways:

- Sleep mode – there are two sleep modes: sleep mode and cyclic sleep mode.

Sleep mode is used to wake up and put the module to sleep using a hardware contact. When the contact is activated, the module enters sleep mode after completing any transmitting or receiving in progress. If the module is not connected to the network, it will enter sleep mode when connected [5].

When a connected end device wakes up from sleep mode, it sends a polling request to the base station to see if the station has buffered data for the end device. The end device will continue to send polling requests every 100 ms as long as it remains active.

Cyclic sleep allows the modules to wake up periodically to check for data from the station and sleep when inactive. In cyclic sleep mode, if serial or RF data is received, the module will start an inactivity timer and remain awake until the timer expires. While the module is awake, it will continue to send polling requests to its station to check the buffered data every 100 ms. The timer will restart whenever serial or RF data is received. The module will resume sleep mode when the timer expires.

- Data aggregation and buffering – As with other protocols, data aggregation sends multiple data frames in a single transmission. This reduces the overhead of 802.11 because numerous packets can be sent with a single header instead of each packet having its own header.

- Transmitter power management – When building a network, you can adjust the transmitter power of devices to reduce power consumption while preventing the signal from being too weak to reach the station.

- Frequency response control – Zigbee uses 16 channels (11th to 26th) in the 2.4 GHz band worldwide, 13 channels in the 915 MHz band in North America, and one channel in the 868 MHz band in Europe. Some devices also use the 784 MHz band in China for Zigbee [6].

Each Zigbee device uses a bandwidth of up to 2 MHz in these channels, while a 5 MHz guard band separates any two channels to prevent interference

caused by other Zigbee devices. This avoids collision during data transmission.

- Optimization of transmission routes – ZigBee has basic network topology options: Star, Tree, and Mesh [7]. By configuring transmission routes, you can reduce the number of hops in the path or reduce or eliminate transmission through intermediate nodes in a mesh topology.

The 6LoWPAN protocol was developed based on IEEE802.15.4 to build a network based on IPv6 addressing with independent organization of routing in the network [8].

6LoWPAN energy optimization is performed in the following ways:

- Sleep mode – To reduce the energy consumption of a 6LoWPAN node, a channel access mechanism based on the node's sleep state is proposed. Its idea is that nodes can sleep appropriately during both the superframe delay and superframe sleep periods [9].

- IPv6 Header Compression – 6LoWPAN supports header compression in the IPv6 addressing system as one of its features to reduce the number of bits in the header through compression techniques [10].

HC1 was the first IPv6 header compression method for 6LoWPAN proposed in RFC 4944 in 2007. HC1 is an acronym for Header Compression 1. Instead of 40 bytes of the IPv6 header, 2 bytes indicate how the IPv6 header is compressed and where its value can be recovered during decompression [11].

A header compression technique that can compress local, global unicast, and multicast IPv6 addresses is Internet Protocol Header Compression (IPHC). This encoding can consist of 2 bytes (in local link communication) or 3 (with additional contextual encoding).

S&SFHC is an abbreviation for second and subsequent fragment header compression. This header compression method is suggested when packets need to be fragmented. Ideally, the IPv6 header should be transmitted with all fragments of the same packet. In S&SFHC, the header from the first fragment is stored in a header dictionary. The header dictionary stores a copy of the header received in the first fragment. The recipient sends an 8-bit unique link identifier (LUI) to the sender from its list of accessible unique identifiers (FUIList). The sender replaces the IPv6 header with this identifier in subsequent fragments. S&SFHC uses two approaches – standalone and integrated. In the standalone approach, the header in the first fragment is sent without any compression. In subsequent fragments, the header is replaced by the compressed S&SFHC header, i.e., the LUI, which the recipient sends. In the integrated approach, the

header in the first fragment is compressed using IPHC technology, and the compressed S&SFHC header is in the following fragments.

– Fragmentation and reassembly – The existing limitations in 6LoWPAN are one of the main challenges in data aggregation techniques. However, traditional CSMA/CA at the MAC layer can cause significant transmission, control overhead, and delay during listening and channel competition. It could be more efficient to transmit an IPv6 packet because of the large packet header. The solution to this problem is to aggregate data from multiple packets into one if it does not have consequences due to data transmission delay [12].

– Frequency response control – The PHY layer specification defines how 6LoWPAN devices can communicate with each other over the wireless channel. A total of 27 channels are represented at the PHY layer. These channels are distributed in different frequency bands with varying data rates [13]. Controlling the channel allocation reduces the number of collisions that occur during data transmission. It reduces the number of retransmissions that must happen in the event of a crash during simultaneous transmission.

– Optimization of transmission routes – Like ZigBee, the 6LoWPAN protocol supports multiple network topologies. It allows for building more flexible networks and redirecting routes to reduce the load on specific network nodes used as routers.

WirelessHART is developed based on the HART protocol to enable data transmission over a radio channel instead of a cable connection [14]. The protocol uses IEEE802.15.4 as the basis for networking.

The WirelessHART energy consumption is optimized in the following ways:

– Sleep and activation mode – Wireless HART electronics have ultra-low power consumption to maximize battery life, 20 times less than a conventional 4-20 mA HART device [15]. Sleep mode allows for turning off the power when it is unnecessary. Thus, the sensor itself is turned off between two measurements. If the refresh rate is low enough, the device will go into "hibernation" as often as possible between two measurements.

– Transmitter power management – WirelessHART allows for adjusting the transmitter power depending on the communication conditions and distance to the receiver [16]. Adjusting the transmitter power to the minimum required level to ensure stable communication can reduce power consumption, mainly when devices are close to each other. By default, a transmitter with a power of 10 dBm (10 milliwatts) is used [17].

– Frequency mesh – using Direct-sequence spread-spectrum (DSSS) with frequency hopping between 15 channels in this range allows for security and reduced interference that would require retransmitting a packet to recover it [17].

– Network topology management – The WirelessHART network topology can be a star, cluster, or mesh, which provides much better scalability. It also makes it possible to control the load distribution between the base stations and limit the transmitter power, reducing end devices' overall energy consumption [18].

– Buffering and data aggregation – Data aggregation is the process of aggregating data from multiple sensors to eliminate the number of transmissions and provide fused information to the base station. Data aggregation usually involves combining data from various sensors at intermediate nodes and transmitting the aggregated data to the base station [19]. Existing data aggregation methods cannot be directly applied to the WirelessHART network due to its features, including the Multichannel Synchronized Mesh Protocol (TSMP) and superframe-based communication slot scheduling. In particular, data aggregation typically increases the end-to-end latency of packets because they may have to wait for other messages to be aggregated at intermediate nodes, potentially increasing the end-to-end latency of those packets. However, WirelessHART packets typically have strict end-to-end delay requirements, guaranteed by assigning a communication time slot in the superframe scheduling. Thus, the trade-off between energy reduction and real-time communication constraints is a significant design challenge for data aggregation in WirelessHART networks.

– Optimization of transmission routes – With a mesh network topology, you can create more flexible routes to reduce energy consumption at endpoints. It can be realized by reducing the transmitter power over shorter distances and changing the transmission in the mesh network from other nodes to the hub or less loaded nodes.

The study identified the categories by which the considered optimization methods in IoT protocols were distributed:

- Device activity time management;
- Transmission frequency management;
- Transmitter power management;
- Data packet management;
- Route management.

Using information about existing energy optimization methods, we categorized them and analyzed their impact on costs in each protocol and standard (Tables 1-3).

Table 1

Optimization by criteria for ZigBee

Category	Optimization method
Device activity time management	Sleep Mode – up to 99% [20]
Transmission frequency management	Frequency response control – up to 37% [21]
Transmitter power management	Transmitter power management – up to 70.5% [22]
Data packet management	Data aggregation and buffering – up to 49.2%
Route management	Optimization of transmission routes – up to 100%

Table 2

Optimization by criteria for 6LoWPAN

Category	Optimization method
Device activity time management	Sleep mode – up to 99% [9]
Transmission frequency management	Frequency response control – up to 5% [23]
Transmitter power management	-
Data packets management	IPv6 header compression – up to 57.1% [24]
	Fragmentation and reassembly – up to 48.3%
Route management	Optimization of transmission routes – up to 100%

Conclusions. As a result of the research, the primary methods for optimizing energy consumption in IoT protocols were identified. Existing methods were divided into five main optimization categories, and each method's impact on energy consumption when the method is active in the protocol network was determined. The ZigBee and Wireless HART

Table 3

Optimization by criteria for WirelessHART

Category	Optimization method
Device activity time management	Sleep and activation mode – up to 99% [25]
Transmission frequency management	Frequency mesh – up to 3% [26]
Transmitter power management	Transmitter power management – up to 33% [25]
Data packets management	Data buffering and aggregation – up to 48.8% [25]
Route management	Optimization of transmission routes – up to 100%
	Network topology management – up to 100%

protocols have optimization methods for all the defined categories. The 6LoWPAN protocol has 4 categories of optimization methods, except for the Transmitter Power Management category.

The best energy efficiency indicators for optimization methods are "Device Activity Time Management" and "Route Management." This is because devices are turned off when data is not needed to collect and transmit. Since devices can send data from other devices to the data center, the routing setting eliminates unnecessary data transfers and leaves the device in sleep mode longer instead of waiting for data from other devices to be sent.

The worst-performing methods are those in the Frequency response control category because they are based on detecting transmissions that cause collisions. Still, devices are primarily in sleep mode, and their transmissions rarely overlap to cause collisions.

Bibliography:

1. Ala' Khalifeh, Rabi Tanash, Mahmoud AlQudah, Salem Al-Agtash. Enhancing energy efficiency of IEEE 802.15.4– based industrial wireless sensor networks. *Journal of Industrial Information Integration*. Volume 33. 2023. 100460. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100460.
2. Pedro Victor Borges Caldas da Silva, Chantal Taconet, Sophie Chabridon, Denis Conan, Everton Cavalcante, Thais Batista. Energy awareness and energy efficiency in internet of things middleware: a systematic literature review. *Annals of Telecommunications – annales des télécommunications*. 2022. Vol. 78 (1-2). Pp.115-131. DOI: 10.1007/s12243-022-00936-5
3. Algimantas Venckauskas, Nerijus Jusas, Egidijus Kazanavicius, Vytautas Stuičys. An Energy Efficient Protocol For The Internet Of Things. *Journal of Electrical Engineering*. 2015. Vol. 66(1). DOI:10.1515/jee-2015-0007
4. Muthu Ramya Chellappa, Shanmugaraj Madasamy, R. Prabakaran. Study on ZigBee technology. *Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference*. 2021. Vol. 6. DOI:10.1109/ICECTECH.2011.5942102
5. Sleep Options | ZigBee Networking Guide. 2020. URL: <https://development.libelium.com/zigbee-networking-guide/sleep-options> (date of application: 07.10.2024).
6. Zigbee Frequency Bands. URL: <https://www.everythingrf.com/community/zigbee-frequency-bands> (date of application: 07.10.2024).

7. zigbee network topology. 2023. URL: <https://www.iotrouter.com/zigbee-network-topology/> (дата звернення: 07.10.2024).
8. Khalid A. Fakieh. A Survey on 6LoWPAN & its Future Research Challenges. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*. 2014. Vol. 3. Pp. 558-570.
9. CHENG Hong Ubin, WANG Xiao Una, LIANG Wei, NIE Pan Uhong, SUN Xia. Study on Energy Saving for 6LoWPAN under Enabled Node Sleep State. *Computer Engineering & Science*. 2012. Vol. 34.
10. Geetha V. Archana Bhat, S. Thanmayee. New Bit Pattern Based IPv6 Address Compression Techniques for 6LoWPAN Header Compression. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 80055-80070. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3193235
11. Ruchi Garg. Comparative Study on Techniques of IPv6 Header Compression in 6LoWPAN. *Fourth International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology – IPCT 2016*. 2016. DOI: 10.15224/978-1-63248-099-6-33
12. Hu J, Luo J, Zhang Y, Wang P, Liu Y. Location-Based Data Aggregation in 6LoWPAN. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2015. Vol. 11(10). DOI:10.1155/2015/912926
13. Gee Keng Ee, Chee Kyun Ng, Nor Kamariah Noordin, Borhanuddin Mohd. Ali. A Review of 6LoWPAN Routing Protocols. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*. 2010. Vol. 30. DOI: 10.7125/APAN.30.11
14. Devan P.A.M., Hussin F.A., Ibrahim R., Bingi K., Khanday F.A. A Survey on the Application of WirelessHART for Industrial Process Monitoring and Control. *Sensors*. 2021. Vol. 21(15), p. 4951. DOI:10.3390/s21154951
15. WirelessHART® networks: 7 myths that cloud their consideration for process control. URL: <https://new.abb.com/products/measurement-products/wireless-products-and-solutions/wirelesshart-networks-seven-myths-that-cloud-their-consideration-for-process-control> (date of application: 07.10.2024).
16. Tran Duc Chung, Rosdiazli Ibrahim, Vijanth Sagayan Asirvadam, Nordin Saad, Sabo Miya Hassan. Energy Consumption Analysis of WirelessHART Adaptor for Industrial Wireless Sensor Actuator Network. *Procedia Computer Science*. 2017. Volume 105. Pp. 227-234. DOI: 10.1016/j.procs.2017.01.215.
17. WirelessHART Radio Communication Standard. URL: <https://control.com/textbook/wireless-instrumentation/wirelesshart/> (date of application: 07.10.2024).
18. Jianping Song, Song Han, Aloysius Mok, Deji Chen. WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control. *Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2008. RTAS '08. IEEE*. 2008. DOI:10.1109/RTAS.2008.15
19. Feng Li, Lei Ju, Zhiping Jia. Data aggregation framework for energy-efficient WirelessHART networks. *Journal of Systems Architecture*. 2016. Volume 63. Pp 70-79. DOI: 10.1016/j.sysarc.2016.01.009.
20. Chris Baumann. The Importance of sleep mode power consumption in ZigBee/802.15.4 applications. 2006. URL: <https://www.eetimes.com/the-importance-of-sleep-mode-power-consumption-in-zigbee-802-15-4-applications/> (дата звернення: 07.10.2024).
21. Shi Longlong, Qiu Chunling, Gao Peng, Jia Zhengsen. The Research and Simulation of CSMA/CA Mechanism of ZigBee Protocol. *Procedia Engineering*. 2012. Volume 29. Pp 3466-3471. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.01.513.
22. M. C. Ekström, M. Bergblomma, M. Lindén, M. Björkman, M. Ekström. Comparison study of ZigBee and Bluetooth with regards to power consumption, packet-error-rate and distance. *Computer Science, Engineering*. 2012.
23. Rachaen M. Huq, Kevin P. Moreno, Hui Zhu, Jue Zhang. On the Benefits of Clustered Capillary Networks for Congestion Control in Machine Type Communications over LTE. *Computer Communication and Networks (ICCCN), 2015 24th International Conference*. 2015. DOI:10.1109/ICCCN.2015.7288439
24. Emre Ertekin, Christos Christou, Booz Allen Hamilton. IPv6 Header Compression. *North American IPv6 Summit, June 2004*. 2004.
25. Simon Vedel Johansen. *Node energy consumption variations with WirelessHART and RPL in a Wireless Sensor Network*. 2018.
26. Stig Petersen, Simon Carlsen. Performance Evaluation of WirelessHART for Factory Automation. *2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*. 2009. Pp. 1-9. DOI: 10.1109/ETFA.2009.5346996

Іванчук О.В., Козел В.М., Дроздова Є.А., Приходько О.О. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ У ПРОТОКОЛАХ СТАНДАРТУ IEEE 802.15.4

У статті досліджуються існуючі методи оптимізації енергоспоживання в протоколах IEEE 802.15.4 Internet of Things. Були розглянуті такі протоколи: ZigBee, 6LoWPAN і WirelessHART. Протокол ZigBee має сплячий режим, контроль частотної характеристики, управління живленням передавача, агрегацію та буферизацію даних, а також оптимізацію маршруту передачі. 6LoWPAN використовує

сплячий режим, контроль частотної характеристики, стиснення заголовка IPv6, фрагментацію та повторне збирання, а також оптимізацію маршруту передачі. Протокол WirelessHART використовує режим сну та активації, частотну сітку, керування живленням передавача, буферизацію та агрегацію даних, оптимізацію маршруту передачі та керування топологією мережі.

Дослідження вибрало критерії, за якими розподіляються всі методи оптимізації в протоколах IoT: управління часом активності пристрою, управління частотними характеристиками передачі, управління потужністю передавача, управління пакетами даних і управління маршрутами.

Протоколи ZigBee і Wireless HART мають методи оптимізації для всіх запропонованих категорій. Протокол 6LoWPAN має 4 категорії методів оптимізації, за винятком категорії керування живленням передавача.

Найкращі показники енергоефективності мають методи оптимізації «Керування часом активності пристрою» та «Керування маршрутом». Це тому, що пристрої вимикаються, коли дані не потрібні для збору та передачі. Оскільки пристрої можуть надсилати дані з інших пристроїв до центру обробки даних, параметр маршрутизації усуває непотрібну передачу даних і залишає пристрій у режимі сну довше замість очікування надсилання даних з інших пристроїв. Найгірше працюють методи в категорії «Керування частотою передачі», оскільки вони засновані на виявленні передач, які створюють конфлікти. Тим не менш, пристрої перебувають у режимі сну більшу частину часу, і їхні передачі рідко накладаються, тому зіткнення трапляються рідко.

Ключові слова: Інтернет речей, стандарт IEEE 802.15.4, протоколи, енергоефективність, оптимізація, пристрої.

Катін П.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мішин О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК СПЕКТРУ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНО МОДУЛЬОВАНОГО СИГНАЛУ

У роботі наведено розрахунок спектру широтно-імпульсно модульованого (ШІМ) сигналу, отриманого із застосуванням методики аналітичного розрахунку, що розроблена авторами і викладена у [1]. Актуальність даного напрямку досліджень обґрунтована значним розповсюдженням такого виду модуляції у радіокерованих системах (РКС) цивільного застосування. Спектральний аналіз такого сигналу є корисним для розробки самих РКС, вдосконалення методів їх детектування та для боротьби з негативним впливом радіозавад. Існують чисельні методи розрахунку таких спектрів, в той же час аналітичне представлення спектру є більш точним і зручним для використання в деяких випадках. Аналітичний розрахунок спектру ШІМ сигналу, на відміну від простіших випадків модуляції (амплітудна модуляція) є більш складним, одержання аналітичного виразу для ШІМ сигналу не є тривіальним.

В даній роботі було застосовано методику аналітичного розрахунку, що основана на перетворенні Фур'є і розбитті відповідного інтегралу на часові ділянки, що відповідають тривалості окремих імпульсів. Наведено проміжні математичні перетворення та результати застосування методики для випадку ШІМ модуляції синусоїдальним сигналом. Одержано аналітичний вираз для спектру такого сигналу, досліджено його основні властивості, та перевірено відповідність аналітичного виразу і результатів розрахункового експерименту. Результати можуть бути корисними, зокрема, для виділення різниці між одержаним спектром та спектром немодульованого сигналу. Це дозволить виділити частину сигналу, яка являє собою корисне інформаційне навантаження. Отриманий результат у перспективі дасть можливість застосувати методику для розрахунку спектрів більш складних ШІМ сигналів.

Наведено напрямки подальшого дослідження: застосування методики аналітичного розрахунку для складніших модулюючих сигналів, дослідження задачі виявлення та розпізнавання сигналів, та впливу шумів на спектр.

Ключові слова: широтно-імпульсна модуляція, радіокеровані системи, спектр імпульсного сигналу, ряд Фур'є, перетворення Фур'є, інформаційна складова спектру.

Постановка завдання. У виконавчих механізмах (блоках) типових систем дистанційного управління загального призначення у якості сигналу управління використовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Ця технологія широко розповсюджена також і у радіотехнічних системах. У якості практичного прикладу можна навести канали управління квадрокоптерів, моделей літаків, моделей наземних радіокерованих платформ, тощо. Не дивлячись на те, що більш досконалішими є цифрові системи передавання даних на основі радіоканалу, системи на базі ШІМ залишаються у використанні за рахунок простоти, малої вартості при достатньої надійності та прийнятності інших характеристик.

Для вирішення завдань забезпечення радіоелектронної сумісності, дослідження надійності

роботи радіоканалу, математичного забезпечення випробувань потрібно отримати загальний аналітичний вигляд і характеристики спектру ШІМ сигналу. У теорії найбільш точний спектр надає аналітичний метод розрахунку, як варіант із застосуванням методики [1]. Це питання вже піднімалося раніше як суто теоретичне і не отримало значного розвитку, оскільки велика кількість систем віддаленого управління не використовувала ШІМ. На теперішній час, внаслідок того, що виконавчі механізми сучасних систем [2] використовують ШІМ модуляцію, пошук досконалих методик аналітичного розрахунку спектру ШІМ сигналу є актуальним і потребує подальшого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що предметна область обраного напрямку

досліджень є дуже актуальною, оскільки з'являється велика кількість публікацій, присвячених квадрокоптерам та іншим радіокерованим системам [3-8]. Велика частина цих систем використовує ШПМ сигнал у радіоканалі. В той же час у вищезгаданих публікаціях відсутні теоретичні дослідження щодо отримання спектру ШПМ сигналу.

Відповідно цього напрямку провадяться дослідження і є публікації, що оприлюднюють результати удосконалення методик розрахунку спектру ШПМ сигналу [9-12]. До загальних недоліків цих робіт можна віднести: вузьку спрямованість методик (придатність для окремих випадків), відсутність програмного моделювання; відносна складність математичного апарату, що обмежує її для практичного використання. В [1] оприлюднена методика на основі базової моделі сигналу, що дозволяє виправити виявлені недоліки попередніх робіт. В той же час у [1] наведений суто теоретичний приклад сигналу, що не використовується у практиці. Приклад призначений виключно для демонстрації працездатності методики. Для підтвердження ефективності і можливості використання методики потрібно знайти спектр реального ШПМ сигналу, що використовується у сучасних системах дистанційного управління на основі радіоканалу.

Постановка завдання. Метою статті є знаходження спектру ШПМ сигналу з використанням методики [1] на основі базової моделі сигналу для подальших досліджень у галузі розпізнавання (та інших напрямків) з урахуванням природних і промислових шумових завад.

Виклад основного матеріалу. Для постановки завдання введемо вихідні дані щодо сигналу управління і внесемо обмеження.

Нехай в якості сигналу, що буде підлягати переведенню у частотний спектральний вигляд буде використовуватися аналоговий ШПМ сигнал без модуляції радіочастотою. Часове ущільнення не застосовується.

Частота повторення імпульсів не змінюється. Звичайно, що для передавання сигналу через радіоэфір використовуються імпульси, що модульовані високою частотою. В даній роботі введемо обмеження щодо відсутності високочастотного заповнення. В практичних РКС період сигналу визначається приблизно в діапазоні 50–60 Гц.

В якості базової імпульсної послідовності для вищеприданого сигналу обираємо послідовність прямокутних відеоімпульсів, що застосована у [1]. Ця періодична послідовність має фіксований період, амплітуду і тривалість імпульсів. Під

час знаходження спектру ШПМ сигналу будемо застосовувати термін – базова модель сигналу (БМС), що введений у [1].

Використаємо методику [1] для аналітичного розрахунку ШПМ сигналу, що буде промодульований синусоїдальним сигналом. Отриманий результат в перспективі буде розповсюджений на моделювання сигналом довільної форми, з певною точністю.

1. Перший етап знаходження частотного спектру ШПМ сигналу.

Відома формула для розрахунку спектру з використанням перетворення Фур'є визначається виразом (3) і застосована у методиці [1].

$$s(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

Відповідно методиці, потрібно розділити (1), на суму інтегралів. Кожний елемент цієї суми буде відповідати інтегралу, взятого на тривалості відповідного імпульсу БМС. Пронумеруємо імпульси (і відповідні інтеграли) БМС так, що нульовим імпульсом буде той, що розділений віссю ординат на 2 частини (рис. 1) [1]. Імпульси, що знаходяться на від'ємній частині вісі абсцис мають номери -1, -2, ..., а на позитивній частині – +1, +2, ...

Введемо позначення для результату інтегрування кожного елемента I_j у інтегралі (1), отримаємо:

$$s(\omega) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \int_{jT-\frac{T}{2}}^{jT+\frac{T}{2}} A e^{-i\omega t} dt = \sum_{j=-\infty}^{\infty} I_j \quad (2)$$

В виразі (2) значення I_j є результатом знаходження визначеного інтегралу, що відповідає імпульсу з номером j .

На наступному етапі знаходиться інтеграл для нульового імпульсу I_0 та довільного I_j . Шляхом алгебраїчних перетворень можна виразити I_j через I_0 і обчислити таким чином суму (2). Конкретний вигляд запису I_j через I_0 залежить від обраного виду модуляції, але, як правило, включає в себе множення на експоненту зсуву. Наприклад, якщо всі імпульси однакові (модуляція відсутня), це є єдиною відмінністю між I_0 та I_j :

$$I_j = \int_{jT-\frac{T}{2}}^{jT+\frac{T}{2}} A e^{-i\omega t} dt = I_0 e^{-ij\omega T} \quad (3)$$

У нескінченних періодичних сигналах спектр є дискретним. Цей результат отримується при аналізі одержаної суми і її залежності від частоти. Для таких сигналів, кінцевим результатом буде сукупність опису частот з ненульовими складовими, та виразу для обчислення цих складових.

2. Другий етап знаходження частотного спектру ШІМ сигналу.

Розглянемо послідовність імпульсів, модульовану по ширині імпульсу синусоїдальним сигналом з частотою Ω , що набагато менша за частоту повторення імпульсів БМС. У цьому випадку для ширини імпульсу справедливий такий запис:

$$\tau \rightarrow \tau(t) = \tau_0 + \Delta\tau \sin(\Omega t). \quad (4)$$

Будемо вважати, що модуляція відбувається так, що зміна ширини імпульсів не зсуває їх середину, симетрично зсуваючи обидва фронту імпульсу відповідно закону модуляції однією частотою Ω , що є типовим видом ШІМ модуляції у мікроконтролерах архітектури ARM CortexM [11, 12].

У контексті застосування методики [1] і не змінюючи загального характеру досліджень розглянемо послідовність ШІМ сигналу на одному періоді модуляції. Введемо позначку N , що буде відповідати кількості імпульсів БМС в одному періоді Ω для ШІМ сигналу. Тоді, з урахуванням введених позначень, значення I_j для ШІМ сигналу співпадає з (3), за винятком того, що τ вже не є константою а функцією часу і відповідає закону модуляції (4):

$$I_j = A\tau(t) \frac{\sin\left(\tau(t) \frac{\omega}{2}\right)}{\tau(t) \frac{\omega}{2}} e^{-i\omega j T}. \quad (5)$$

Для зручності підстановки, розіб'ємо синус на різницю експонент, і розглянемо окремо отримані доданки: $I_j = \frac{I_{+j} - I_{-j}}{2i}$.

Позитивна частина буде визначатися виразом (6)

$$\begin{aligned} I_{+j} &= \frac{A}{\omega} e^{i \frac{\omega \tau(t)}{2}} \cdot e^{-i\omega j T} = \frac{A}{\omega} e^{i \frac{\omega \tau_0}{2}} e^{i \frac{\omega \Delta \tau \sin(\Omega j T)}{2}} \\ &= I_{+0} e^{i \frac{\omega \Delta \tau \sin(\Omega j T)}{2}} \cdot e^{-i\omega j T} \end{aligned} \quad (6)$$

Перепишемо першу експоненту, використавши тотожність Якобі-Ангера:

$$e^{i \frac{\omega \Delta \tau \sin(\Omega j T)}{2}} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left(\frac{\omega \Delta \tau}{2} \right) e^{in\Omega j T} \quad (7)$$

Тут J_n – n -та функція Бесселя 1-го порядку. Підставивши цей результат в (6), і взявши суму за всіма I_{+j} за один період, отримаємо:

$$\begin{aligned} I_{+j} &= I_{+0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left(\frac{\omega \Delta \tau}{2} \right) e^{in\Omega j T} \cdot e^{-i\omega j T} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_{+0} J_n \left(\frac{\omega \Delta \tau}{2} \right) e^{i(n\Omega - \omega)j T} \\ \sum_{j=0}^{N-1} I_{+j} &= \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_{+0} J_n \left(\frac{\omega \Delta \tau}{2} \right) e^{i(n\Omega - \omega)j T} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{N-1} I_{+0} J_n \left(\frac{\omega \Delta \tau}{2} \right) e^{i(n\Omega - \omega)j T} = \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_{+0} J_n \left(\frac{\omega \Delta \tau}{2} \right) \sum_{j=0}^{N-1} e^{i(n\Omega - \omega)j T} \end{aligned} \quad (8)$$

Тут зміна порядку сумування дозволяє винести за дужки незалежні від j складові.

Розглянемо внутрішню суму. Якщо вираз в дужках $(n\Omega - \omega)T$ кратний 2π , то ця сума вироджується в суму N одиниць, тобто просто N . В іншому випадку ми маємо суму геометричної прогресії:

$$\sum_{j=0}^{N-1} e^{i(n\Omega - \omega)j T} = \frac{1 - e^{i(n\Omega - \omega)NT}}{1 - e^{i(n\Omega - \omega)T}} \quad (9)$$

Оскільки сигнал періодичний з частотою Ω , то ненульові значення спектру можуть бути лише на частотах, кратних Ω , а для таких частот чисельник буде рівним нулю (оскільки вираз в експоненті буде кратний $\Omega NT = 2\pi$).

Таким чином, внутрішня сума (8) є ненульовою лише при $\omega = n\Omega + 2k\pi/T$, і рівна N в цьому випадку:

$$\sum_{j=0}^{N-1} I_{+j} = NI_{+0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left(\frac{\omega \Delta \tau}{2} \right) \quad (10+)$$

Перетворення аналогічні (6-9) для I_{-j} дадуть результат що представлений наступним виразом:

$$\sum_{j=0}^{N-1} I_{-j} = NI_{-0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left(\frac{-\omega \Delta \tau}{2} \right) \quad (10-)$$

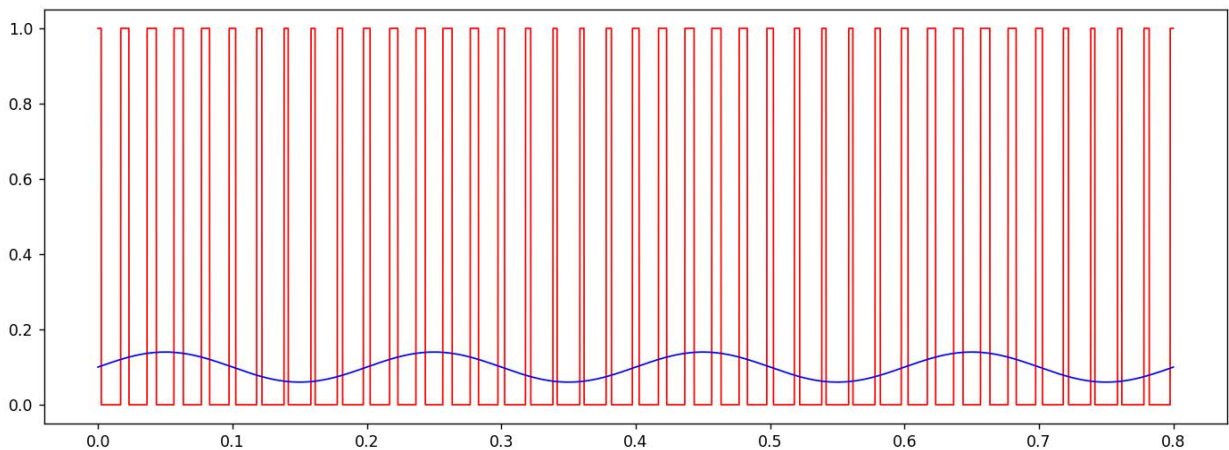


Рис. 1. Приклад ШІМ сигналу і відповідної модулюючої синусоїди

3. Аналіз результатів.

Остаточну формулу отримуємо, підставивши отримані результати з формул (10+) та (10-) до виразу

$$I_j = \frac{I_{+j} - I_{-j}}{2i}$$

Доданки що відповідають $n=0$ дають значення спектру на частотах $\omega=2k\pi/T$. Це частоти спектру немодульованого сигналу. Використаємо наступну властивість функцій Бесселя: функції з парними номерами є парними, а функції з непарними номерами-непарними. Тоді:

$$S\left(\omega = \frac{2k\pi}{T}\right) = N \frac{(I_{-0} - I_{+0})}{2} J_0\left(\frac{\omega\Delta\tau}{2}\right) = J_0\left(\frac{\omega\Delta\tau}{2}\right) \frac{\sin\left(\tau_0 \frac{\omega}{2}\right)}{\tau_0 \frac{\omega}{2}}$$

Правий множник співпадає зі спектром немодульованого сигналу, а лівий множник-константа. Таким чином $n=0$ дає нам гармоніки, що відповідають немодульованому сигналу, домножені на константу.

Кожне наступне значення n буде відповідати відповідній бічній гармоніці, що відступає від основної на $n\Omega$.

Отримали наступний результат: щільність спектру рівна нулю для всіх частот, крім частот кратних частоті імпульсів, та частот, що відхиляються від них на цілу кількість модулюючих частот, і ці ненульові складові можна виразити наступним чином:

$$S\left(\omega = \frac{2k\pi}{T} + n\Omega\right) = J_n\left(\frac{\omega\Delta\tau}{2}\right) \frac{A}{\omega} \sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right); n = 2k, (11.1)$$

$$S\left(\omega = \frac{2k\pi}{T} + n\Omega\right) = J_n\left(\frac{\omega\Delta\tau}{2}\right) \frac{A}{i\omega} \cos\left(\frac{\omega\tau}{2}\right); n = 2k + 1. (11.2)$$

На рис. 2 і рис. 3 наведений приклад застосування отриманих формул. На рис. 2 червоним зображено спектр модульованого сигналу, синім – огинаюча, обчислена для немодульованого сигналу(для порівняння), зеленим – огинаюча, обчислена за (11.1) для $n=0$.

Одержаний аналітичний результат і результат розрахункового експерименту достатньо точно збігаються.

4. Аналіз одержаного спектру.

Основними відмінностями одержаного спектру від спектру немодульованого сигналу є зміна

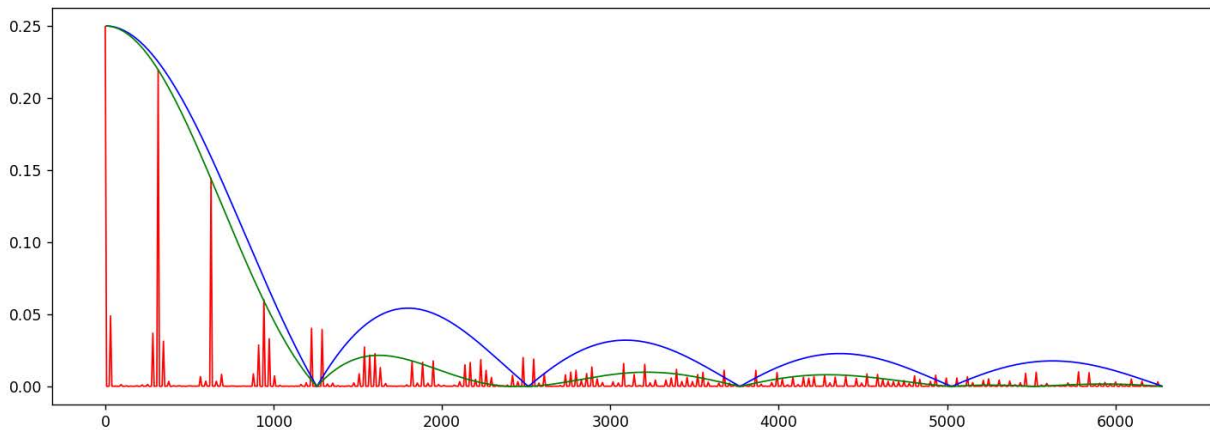


Рис. 2. Спектр ШІМ і огинаюча нульової гармоніки, розрахована за формулою (11.1)

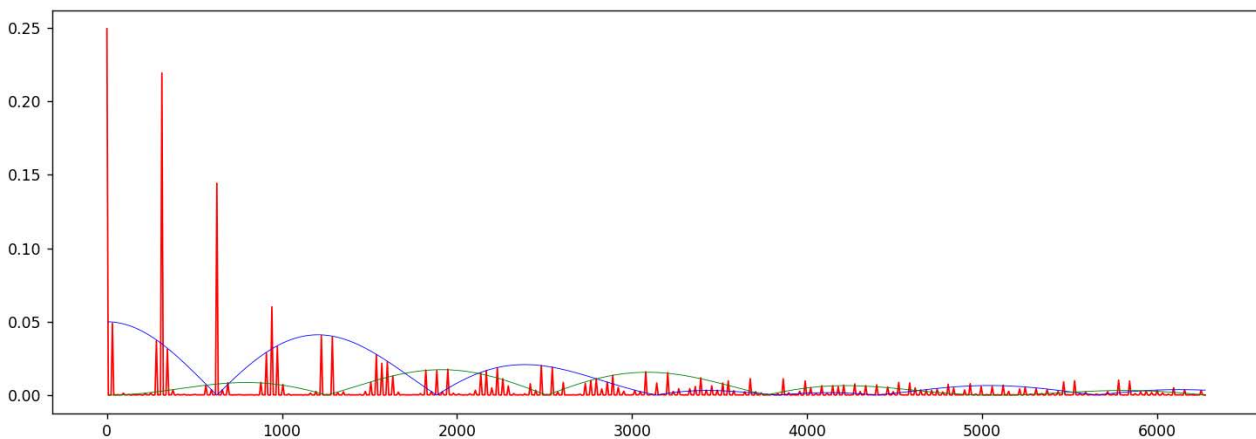


Рис. 3. Спектр ШІМ і огинаючі перших двох гармонік, розрахованих за формулами (11)

висот основних максимумів та наявність бічних гармонік. Ці відмінності несуть в собі інформацію про модулюючий сигнал: відхилення бічних гармонік відповідають частоті цього сигналу, а їх амплітуди, як і зміни амплітуд основних гармонік, залежать від інтенсивності цього сигналу (через зміну ширини сигналів).

Для розглянутих обмежень (частота модулюючого сигналу значно більша за частоту імпульсів, а зміна ширини імпульсу невелика в порівнянні з базовою шириною) гармоніки швидко спадають зі зростанням n , особливо для малих частот. Відносна амплітуда бічних гармонік є максимальною для частот, що відповідають першим максимумам і першій гармоніці: $n=1, -1$; $k=0, 1$. Можна очікувати що приймаючий пристрій може з більшою ефективністю розпізнавати корисний сигнал якщо він буде налаштований саме на цих частотах.

Подальша робота буде проводитись в наступних напрямках:

1. Узагальнення результату для випадку модуляції складним сигналом
2. Вплив природних і промислових шумів на спектр сигналу.
3. Дослідження впливу змін спектру на виявлення і розпізнавання сигналу.

Висновки. Показана ефективність методики розрахунку спектру на основі БМС, що розроблена у [1].

Застосовано методику аналітичного розрахунку спектру до широтно-імпульсно модульованого сигналу. Одержаний результат відповідає дійсності для випадку модуляції синусоїдальним сигналом. Проаналізовано відмінності від немодульованого сигналу. Саме ці відмінності несуть інформацію про модулюючий сигнал, і є критичними для його розпізнавання.

Список літератури:

1. Мішин О.В., Катін П.Ю. Методика для спрощення аналітичного розрахунку спектру складних імпульсних сигналів в системах радіокерування. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2024. Том 35 (74) № 5. С. 38–44.
2. Katin, Pavlo and Chmelov, Viacheslav and Shemaev, Vladimir, Development of Typical ‘State’ Software Patterns for CortexM Microcontrollers in Real Time (June 26, 2020). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(9 (105)), 29–38, 2020, doi: 10.15587/1729-4061.2020.205377, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3719729>
3. Сушин І.О., Буткевич Г.Ю. Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2023. Том 34 (73) № 6. С. 39–45. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/07>
4. Сайко В.Г. Наритник Т.М. Модель забезпечення функціонування інтегрованої інфраструктури на базі літаючої мережі БПЛА. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2023. Том 34 (73) № 4. С. 5–10. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/02>
5. Довбиш І.О. Муравйов О.В. Галаган Р.М. Богдан Г.А. Момот А.С. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА. 2023. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 34 (73) № 5. С. 16–20. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/04>
6. Муравйов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2023. Том. 34 (73). № 2. С. 199–205.
7. Є.В. Вербицький. Особливості розрахунку спектру напруги, модульованої по закону ШІМ I і II на основі подвійного ряду Фур'є. 2015. ElectronComm, Vol. 20, №5(88). С. 36–45.
8. Похиленко О., Катін, П. ПАТЕРН «СТАН» ДЛЯ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ З МОЖЛИВІСТЮ ДИНАМІЧНОГО СТВОРЕННЯ СТАНІВ. Технічні науки та технології, (1(23)), 118–127. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1\(23\)-118-127](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1(23)-118-127)
9. AN4776 Application note General-purpose timer cookbook for STM32 microcontrollers. <https://www.st.com/>
10. Zi Tao1, a, Li Zhi2,b, Jia Long3. The SPWM Pulse Width Signal Spectrum Analysis Based on MATLAB Advanced Materials Research Online. 2013. Vols. 756-759, pp 4147–4151 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.756-759.4147.
11. Soumya S. Dr. B. V. Sumangala. Application Of Space Vector Modulation Technique For Three Level Neutral Point Clamped Inverters. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2013. Vol. 2 Issue 6. С. 2909–2913 www.ijert.org.
12. Hang Zhu, Yubin Lan, Wenfu Wu. Development of a PWM Precision Spraying Controller for Unmanned Aerial Vehicles. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, P. R. China <https://www.ars.usda.gov/>

Katin P.V., Mishyn O.Yu. ANALYTICAL CALCULATION OF THE SPECTRUM OF A PULSE WIDTH MODULATED SIGNAL

This work presents the calculation of the spectrum of a pulse-width modulated (PWM) signal performed using the analytical calculation method developed by the authors and presented in [1]. The relevance of this research direction is justified by the widespread usage of this type of modulation in radio-controlled systems (RCS) for civilian use. Spectral analysis of such a signal is useful for the development of RCSs themselves, as well as improving their detection methods and combating the negative impact of radio interference. There are numerical methods for calculating such spectra, but at the same time the analytical representation of the spectrum would be more accurate and convenient for some use cases. Analytical calculation of the spectrum of a PWM signal, in contrast to simpler cases of modulation (amplitude modulation), is more complex, obtaining an analytical expression for a PWM signal is not trivial.

In this work, the analytical calculation method was applied, which is based on the Fourier transform and the division of the corresponding integral into time segments corresponding to the duration of individual pulses. Intermediate mathematical transformations and the results of applying the method for the case of PWM modulation by a sinusoidal signal are presented. An analytical expression for the spectrum of such a signal is obtained, its main properties are analyzed, and the correlation of the analytical expression and the results of the calculation experiment is checked. The results can be useful, in particular, for highlighting the difference between the obtained spectrum and the spectrum of the unmodulated signal. This will allow highlighting the part of the signal that represents the useful information load.

The obtained result will make it possible to apply the method in the future to calculate the spectra of more complex PWM signals.

Directions for further research are presented: application of the analytical calculation method for more complex modulating signals, study of the problem of signal detection and recognition, and the influence of noise on the spectrum.

Key words: *pulse-width modulation, radio controlled systems, spectrum of pulse signal, Fourier series, Fourier transform, information component of the spectrum.*

Левченко Д.С.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Баранов Є.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Гаврилук А.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Малий О.Ю.

Національний університет «Запорізька політехніка»

СТРУКТУРА ТА ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ЗАВДАНЬ

Стаття присвячена дослідженню структури та основних компонентів сучасних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для автономних завдань. Мета роботи полягає у всебічному аналізі технологічних аспектів, що забезпечують ефективне функціонування БпЛА в умовах обмеженого зв'язку та необхідності автономного прийняття рішень. У роботі розглядаються ключові виклики, що постають перед розробниками сучасних БпЛА, зокрема: забезпечення надійної автономної навігації в умовах відсутності або нестабільності GPS-сигналу, розробка ефективних алгоритмів прийняття рішень, забезпечення надійного та захищеного зв'язку, ефективна інтеграція різних підсистем БпЛА та оптимізація енергоспоживання. Проводиться детальний аналіз п'яти основних підсистем БпЛА: силової установки, системи управління, системи зв'язку, навігаційної системи та корисного навантаження. Особлива увага приділяється порівнянню різних типів силових установок, включаючи електричні двигуни, двигуни внутрішнього згорання та перспективні іонні двигуни. Розглядаються особливості систем управління на базі бортових комп'ютерів з використанням відкритих операційних систем та систем реального часу. У статті аналізуються сучасні технології зв'язку, що використовуються в БпЛА, включаючи різні частотні діапазони та протоколи передачі даних. Детально розглядаються навігаційні системи, від простих інтегрованих систем на основі мікромеханічних датчиків до складних авіаційних інерційних навігаційних систем. Результати дослідження включають комплексний огляд ключових технологій, що лежать в основі сучасних БпЛА, таких як системи управління польотом на базі нейронних мереж, передові сенсори та датчики, енергоефективні акумуляторні системи, інноваційні матеріали та конструкції, а також алгоритми штучного інтелекту для обробки даних та прийняття рішень. Особливу увагу в роботі приділено питанням автономної навігації БпЛА, включаючи методи візуальної одометрії, SLAM та використання нейронних мереж для обробки сенсорних даних. Підкреслюється важливість інтеграції різних технологій для досягнення синергетичного ефекту, що дозволяє БпЛА ефективно виконувати складні автономні завдання.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БпЛА), автономна навігація, системи управління польотом, сенсорні технології, енергетичні системи, штучний інтелект, обробка даних в реальному часі, інерціальні навігаційні системи, SLAM, візуальна одометрія, адаптивні алгоритми, нормативно-правове регулювання.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БпЛА) відкриває нові горизонти їх застосування у різноманітних сферах людської діяльності [1, с. 80]. Однак, разом з розширенням можливостей БпЛА, зростає і складність завдань, які вони повинні виконувати, особливо в умовах автономної роботи. Це створює ряд критичних викликів, які потребують комплексного вирішення.

Забезпечення надійної автономної навігації БпЛА в умовах відсутності або нестабільності GPS-сигналу стає все більш актуальним [2, с. 24]. Це тісно пов'язано з необхідністю розробки ефективних алгоритмів прийняття рішень для БпЛА в автономному режимі, здатних адекватно реагувати на зміни навколишнього середовища та оптимізувати маршрут без постійного контролю оператора [3, с. 334].

Ефективна інтеграція різних підсистем БПЛА, включаючи навігаційну систему, систему управління польотом, сенсори та системи зв'язку, залишається складним завданням, яке вимагає оптимальної взаємодії всіх компонентів та ефективної обробки даних в реальному часі [4, с. 200]. Це безпосередньо впливає на енергоефективність БПЛА, де збільшення тривалості польоту та розширення функціональних можливостей апаратів вимагає розробки більш ефективних джерел живлення та оптимізації енергоспоживання всіх бортових систем [5, с. 175].

Вирішення цих взаємопов'язаних проблем вимагає комплексного підходу, який би враховував технологічні аспекти розробки та застосування БПЛА. Це створює потребу в міждисциплінарних дослідженнях та розробці інноваційних рішень, які дозволять повною мірою реалізувати потенціал БПЛА в умовах автономної роботи [6, с. 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій
Останні роки характеризуються значним прогресом у розробці та вдосконаленні технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що знаходить відображення у численних дослідженнях та публікаціях. Особлива увага приділяється проблемам автономної навігації та функціонування БПЛА.

У роботі Афтаназів І.С. та співавторів [7, с. 58] представлено комплексний огляд методів керування БПЛА, де особливий акцент зроблено на алгоритмах автономного прийняття рішень. Автори підкреслюють важливість розробки адаптивних систем управління, здатних ефективно функціонувати в динамічних середовищах.

Печурін М.К. та ін [8, с. 50] розглядають сучасні підходи до автономної навігації БПЛА, зокрема, методи візуальної одометрії та SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Автори наголошують на перспективності цих технологій для забезпечення надійної навігації в умовах відсутності GPS-сигналу.

Постановка завдання. Аналіз цих та інших публікацій свідчить про комплексний характер проблем, пов'язаних з розробкою та застосуванням БПЛА для автономних завдань. Дослідники підкреслюють необхідність міждисциплінарного підходу, який би охоплював технологічні аспекти використання БПЛА. Разом з тим, залишається ряд невирішених питань, зокрема, в області надійної автономної навігації в складних умовах, ефективної інтеграції різних підсистем БПЛА та забезпечення їх енергоефективності, що вказує на актуальність подальших досліджень у цій сфері.

Виклад основного матеріалу. Сучасний БПЛА є складною системою, що складається з багатьох взаємопов'язаних компонентів. Розуміння цієї структури є ключовим для розробки ефективних автономних систем (рис. 1).

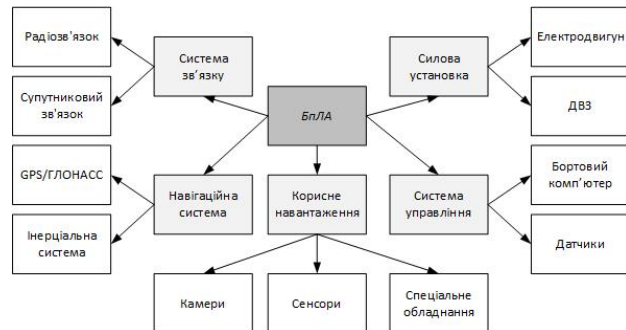


Рис. 1. Структура БПЛА

Як видно з рисунку 1, БПЛА складається з п'яти основних підсистем:

1. Силова установка забезпечує енергію для польоту та роботи всіх систем. Може бути представлена електродвигуном або двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ).
2. Система управління включає бортовий комп'ютер та різноманітні датчики для контролю стану БПЛА та навколишнього середовища.
3. Система зв'язку забезпечує обмін даними між БПЛА та наземною станцією управління або іншими БПЛА.
4. Навігаційна система відповідає за визначення положення БПЛА у просторі та планування маршруту. Включає GPS/ГЛОНАСС приймачі та інерціальні системи навігації.
5. Корисне навантаження складається з обладнання, необхідного для виконання конкретних завдань – камер, сенсорів та іншого спеціалізованого обладнання.

Розглянемо детальніше основні підсистеми БПЛА [9, с. 30]. За типом силової установки БПЛА поділяються на ті, що використовують електричні двигуни, та оснащені двигунами внутрішнього згоряння, включаючи ракетні двигуни. Двигуни на рідкому паливі мають перевагу в тривалості роботи (8–10 годин), тоді як електричні БПЛА функціонують 3–4 години, але відрізняються вищою надійністю та маневреністю. Ведуться розробки БПЛА з іонними двигунами, які мають високу економічність, але низьку тягу.

Керування БПЛА здійснюється бортовим комп'ютером з використанням відкритих операційних систем або спеціалізованих систем реального часу. Основне призначення програмного забезпечення – обробка інформації від датчиків

для управління силовою установкою та системою зв'язку. Сучасні рішення інтегрують бортовий комп'ютер та основні системи на єдиній платі з процесором архітектури RISC ARM.

Для комунікації використовується командна радіолінія зв'язку, що функціонує в різних частотних діапазонах. На великих відстанях застосовуються БПЛА-ретранслятори або супутниковий зв'язок. У простих БПЛА можуть використовуватися мобільні мережі, WiFi, WiMAX та LTE. При відсутності команд, БПЛА переходить в режим автопілотування з використанням різних алгоритмів.

Основними навігаційними системами БПЛА є супутникові радіонавігаційні системи. Прості системи забезпечують точність 1–2,5 м, складніші використовують додаткові елементи. Проблемою є висока маса точних систем, тому на легких БПЛА встановлюються простіші системи з мікромеханічними датчиками. Їх точність без корекції від супутникових систем обмежена, але може бути підвищена за допомогою додаткових засобів, таких як барометри та лазерні висотоміри.

Залежно від специфіки поставлених завдань, на борту БПЛА можуть додатково встановлюватися такі системи та пристрої, як: система розвідки (оптико-електронної, тепловізійної, радіолокаційної, радіо- та радіотехнічної, радіаційної, хімічної, бактеріологічної та інших видів розвідки); засоби для радіоелектронної боротьби або пристрої радіоелектронних перешкод; при-

строї наведення та корекції керованої зброї; засоби ураження цілей різних типів; засоби управління та зв'язку з наземним пунктом управління; апаратура автоматичного пілотування та посадки; транспортувальні касети, відсіки, кріплення тощо (табл. 1).

Сучасні БПЛА поєднують передові технології, які постійно вдосконалюються [10, с. 88]. Основу їх оснащення складають системи управління польотом, сенсори, технології зв'язку, енергетичні системи, інноваційні матеріали та алгоритми штучного інтелекту (рис. 2).



Рис. 2. Ключові технології БПЛА

Системи управління польотом у сучасних БПЛА включають складні автопілоти з комбінацією датчиків для точного визначення положення та орієнтації. Алгоритми на основі нечіткої логіки та нейронних мереж забезпечують адаптивність до різних умов польоту.

Таблиця 1

Основні систем БПЛА

Система БПЛА	Ключові характеристики	Особливості
1. Силова установка	– Електричні двигуни – Двигуни внутрішнього згорання – Ракетні двигуни – Іонні двигуни (розробляються)	– ДВЗ: тривалий час роботи (8-10 год) – Електродвигуни: 3-4 год роботи, надійні, легкі – Іонні: економічні, тривалий час роботи, слабка тяга
2. Електронна система управління	– Бортовий комп'ютер – ОС: Linux або спеціалізовані системи реального часу	– Обробка даних з датчиків – Управління двигуном та зв'язком – Тенденція до інтеграції на одній платі – Процесор: архітектура RISC ARM
3. Система зв'язку «телеметрії»	– Командна радіолінія – Діапазони: УКХ, L, S, C, X – Для малих БПЛА: мобільні мережі, WiFi, WiMAX, LTE	– Дальній зв'язок: БПЛА-ретранслятори, супутниковий зв'язок – Автопілот при втраті зв'язку
4. Навігаційна система	– Супутникові радіонавігаційні системи – Частоти: 1,1-1,6 ГГц – Додаткові елементи: акселерометри, гіроскопи, барометри, лазерні висотоміри	– Точність для малих БПЛА: 1-2,5 м – Проблема: висока маса точних систем – Рішення для малих БПЛА: мікромеханічні датчики – Похибка без корекції: до 3 м за 1 хв
5. Додаткові системи	– Системи розвідки – Засоби радіоелектронної боротьби – Пристрої наведення зброї – Засоби ураження цілей – Апаратура автопілотування та посадки	Встановлюються залежно від конкретних завдань БПЛА

Сенсори, такі як лідари, мультиспектральні камери та радары, розширюють можливості БпЛА для виконання різноманітних завдань. Технології зв'язку забезпечують надійну передачу даних та команд, включаючи захищені протоколи та супутниковий зв'язок.

Енергетичні системи вдосконалюються для підвищення тривалості польотів, використовуючи літій-полімерні акумулятори та гібридні силові установки. Передові матеріали та конструкції дозволяють створювати легкі та міцні БпЛА.

Штучний інтелект та обробка даних відіграють важливу роль, дозволяючи дронам розпізнавати об'єкти та приймати автономні рішення. Інтеграція цих технологій розширює можливості БпЛА у різних галузях.

Автономна навігація є ключовим аспектом, особливо в умовах відсутності GPS-сигналу, забезпечуючи безпечне та точне переміщення дрона.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз структури та основних компонентів сучасних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для автономних завдань. Виявлено, що ключовими елементами БпЛА є силова установка, система управління, система зв'язку, навігаційна система та корисне навантаження, кожна з яких відіграє критичну роль у забезпеченні ефективного функціонування апарату. Встановлено, що сучасні БпЛА характеризуються високим рівнем інтеграції різноманітних передових технологій, включаючи системи

управління польотом на базі нейронних мереж, високоточні сенсори, енергоефективні акумуляторні системи та алгоритми штучного інтелекту для обробки даних та прийняття рішень.

Особливу увагу було приділено проблемам автономної навігації БпЛА, зокрема в умовах відсутності або нестабільності GPS-сигналу. Визначено перспективність методів візуальної одометрії та SLAM для забезпечення надійної навігації в складних умовах. Аналіз показав, що ефективна інтеграція різних підсистем БпЛА та оптимізація енергоспоживання залишаються ключовими викликами для розробників. Вирішення цих проблем вимагає комплексного міждисциплінарного підходу та подальших досліджень у галузі автономних систем управління, енергоефективних технологій та адаптивних алгоритмів прийняття рішень.

Результати дослідження підкреслюють важливість подальшого розвитку технологій БпЛА для розширення їх можливостей та сфер застосування. Зокрема, перспективними напрямками є вдосконалення систем автономного прийняття рішень, розробка більш ефективних джерел живлення та оптимізація взаємодії різних підсистем БпЛА. Таким чином, дане дослідження створює основу для подальших розробок у сфері автономних БпЛА та окреслює ключові напрямки для інновацій, що можуть значно розширити можливості використання безпілотних технологій у різноманітних галузях людської діяльності.

Список літератури:

1. UAV sensor platform / G. A. Sandness et al. *Journal of environmental and engineering geophysics*. 1997. Vol. 2, no. 2. P. 79–88. URL: <https://doi.org/10.4133/jeeg2.2.79> (date of access: 08.10.2024).
2. Деркач М. В., Матюк Д. С. Застосування модулю GY-521 для орієнтації БПЛА. *ВІСНИК СХІДНОУ-КРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ імені Володимира Даля*. 2020. № 7 (263). С. 24–28. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-24-28> (дата звернення: 08.10.2024).
3. Гула В. Сенсори та методи візуальної навігації для автономних БпЛА. *Grail of science*. 2024. № 42. С. 333–335. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.02.08.2024.046> (дата звернення: 08.10.2024).
4. Grzyb Ł., Gazda K. Uav forensics. *Cybersecurity & cybercrime*. 2024. Vol. 1, no. 4. P. 195–212. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7105> (date of access: 08.10.2024).
5. Кучеренко О. І., Вакалюк Т. А. Огляд технічних та програмних засобів керування БпЛА. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2(89). С. 170–176. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.24> (дата звернення: 08.10.2024).
7. Особливості розгортання мереж мобільного зв'язку за допомогою БпЛА / А. В. Антоненко та ін. *Таврійський науковий вісник. Серія: технічні науки*. 2024. № 3. С. 3–12. URL: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.1> (дата звернення: 08.10.2024).
8. Уточнення координат ворожих БПЛА засобами кінематичного проектування / І. С. Афтаназів та ін. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2024. Т. 34, № 1. С. 53–60. URL: <https://doi.org/10.36930/40340108> (дата звернення: 08.10.2024).
9. Моделі топологій слабовипромінюючої телекомунікаційної системи взаємодіючих БПЛА / М. К. Печурін та ін. *Problems of informatization and management*. 2022. Т. 4, № 72. С. 48–54. URL: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.72.17461> (дата звернення: 08.10.2024).
10. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів органами та підрозділами поліції: метод. рек. / А. А. Саковський, С. М. Науменко, С. І. Кравченко, І. М. Єфіменко та ін. Київ: Нац. акад. внутр. справ. 2022. 72 с.

Levchenko D.S., Baranov E.O., Gavryliuk A.O., Malyi O.Yu. STRUCTURE AND MAIN COMPONENTS OF MODERN UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR AUTONOMOUS TASKS.

The article is devoted to the study of the structure and main components of modern unmanned aerial vehicles (UAVs) for autonomous tasks. The purpose of the work is to comprehensively analyze the technological aspects that ensure the effective functioning of UAVs in conditions of limited communication and the need for autonomous decision-making. The paper discusses the key challenges faced by developers of modern UAVs, in particular: ensuring reliable autonomous navigation in the absence or instability of a GPS signal, developing effective decision-making algorithms, ensuring reliable and secure communication, effective integration of various UAV subsystems and optimization of power consumption. A detailed analysis of the five main subsystems of the UAV is carried out: power plant, control system, communication system, navigation system and payload. Particular attention is paid to comparing different types of propulsion systems, including electric engines, internal combustion engines, and advanced ion engines. The features of control systems based on on-board computers using open operating systems and real-time systems are considered. The article analyzes modern communication technologies used in UAVs, including various frequency bands and data transmission protocols. The following are considered in detail navigation systems, from simple integrated systems based on micromechanical sensors to complex aircraft inertial navigation systems. The research findings include a comprehensive review of the key technologies underlying of modern UAVs, such as neural network-based flight control systems, advanced sensors and transducers, energy-efficient battery systems, innovative materials and structures, and artificial intelligence algorithms for data processing and decision making. Particular attention is paid to the following issues autonomous navigation of UAVs, including visual odometry, SLAM, and the use of neural networks for processing sensor data. The importance of integrating different technologies to achieve a synergistic effect that allows UAVs to effectively perform complex autonomous tasks is emphasized.

Key words: *unmanned aerial vehicles (UAVs), autonomous navigation, flight control systems, sensor technologies, energy systems, artificial intelligence, real-time data processing, inertial navigation systems, SLAM, visual odometry, adaptive algorithms, regulatory framework.*

Луцюк А.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

ПРЕДИКТИВНИЙ МОНІТОРИНГ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Сучасні інформаційно-комунікаційні системи, зокрема мережі Інтернету речей (IoT), характеризуються швидким зростанням складності через збільшення кількості підключених пристроїв та обсягів мережного трафіку. Це створює значні виклики для традиційних методів моніторингу та керування, які не завжди здатні забезпечити необхідний рівень стабільності, безпеки та якості обслуговування (QoS) через обмежені можливості обробки великих обсягів даних у реальному часі. У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні нових підходів, здатних прогнозувати потенційні проблеми в інформаційно-комунікаційній мережі ще до їхнього виникнення.

В роботі розроблено та досліджено метод предиктивного моніторингу інформаційно-комунікаційних систем та мереж на основі машинного навчання, що базується на спеціалізованій моделі, яка здатна забезпечувати високу точність прогнозування з використанням відносно невеликої кількості параметрів моделі. Як основу для цієї моделі запропоновано просту нейронну мережу, яка дає змогу спростити процес навчання та не потребує значних обчислювальних ресурсів, що робить її придатною для впровадження в реальних мережних пристроях з обмеженими ресурсами. Для навчання моделі використано набір даних LUFLOW, що містить промарковану інформацію про мережний трафік, зібраний за допомогою спеціальних інструментів моніторингу та захоплення трафіку.

У ході дослідження проведено аналіз ключових параметрів, що впливають на точність прогнозування, зокрема обсягів вхідного та вихідного трафіку, номери портів та IP-адреси джерела і призначення. Використані функції активації ELU та оптимізатор Adamax забезпечили стабільний процес навчання моделі та високу точність класифікації, яка досягла 92%. Це підтверджує ефективність запропонованого підходу для предиктивного моніторингу в інформаційно-комунікаційних системах.

Результати роботи свідчать про перспективність використання машинного навчання для прогнозування станів інформаційно-комунікаційних систем. Запропонована модель дозволяє не лише виявляти відомі аномалії в режимі реального часу, але й передбачати виникнення нових на основі попередніх даних моніторингу, що підвищує відмовостійкість мережі та покращує якість обслуговування користувачів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію архітектури нейронної мережі та розширення набору даних для підвищення точності та універсальності моделі.

Ключові слова: система моніторингу, предиктивний моніторинг, інформаційно-комунікаційна система, машинне навчання, нейронна мережа.

Постановка проблеми. Сучасні інформаційно-комунікаційні системи, зокрема мережі Інтернету речей (IoT), стають дедалі більш складними через стрімке зростання кількості мережного обладнання та обсягів трафіку. Це призводить до суттєвого ускладнення процесу моніторингу та керування такими системами. Традиційні методи аналізу та керування мережами вже не в змозі повністю забезпечити стабільність та безпеку функціонування цих систем через обмежені можливості обробки та аналізу даних у реальному часі. Зростаючі вимоги до забезпечення якості обслуговування (QoS), безпеки мережі та ефективного використання ресурсів потребують нових підходів до моніторингу, які здатні передбачати потенційні проблеми та аномалії ще до їхнього виникнення.

Одним із перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є впровадження методів машинного навчання для прогнозування станів мережних систем. Використання предиктивного моніторингу дозволяє не тільки виявляти аномалії (збій обладнання, зміна характеристики трафіку, атаки, тощо), а й передбачати їх на основі аналізу історичних даних та виявлених шаблонів (патернів) у мережному трафіку. Проте, існує низка нерозв'язаних питань, пов'язаних із вибором оптимальних моделей машинного навчання, адаптацією цих моделей до різних типів мереж та їхньою здатністю працювати з великими обсягами даних у реальному часі. Ці виклики вимагають подальшого дослідження для створення ефективних та надійних систем виявлення та прогнозування аномалій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи моніторингу в інформаційно-комунікаційних системах є критично важливими для забезпечення надійності та якості обслуговування. Зі зростанням складності мереж та обсягів трафіку традиційні методи моніторингу стають менш ефективними, що спонукає до впровадження методів машинного навчання для предиктивного моніторингу. Над цією проблемою зосереджені як науковці так і бізнес.

У дослідженні [1] розглядаються сучасні методи машинного навчання, які застосовують для моніторингу мереж у реальному часі. Автори підкреслюють важливість швидкої обробки даних та точності виявлення аномалій, що є ключовими для підтримки стабільної роботи інформаційно-комунікаційних систем.

У іншій схожій роботі [2] досліджують застосування глибоких нейронних мереж для аналізу мережного трафіку та виявлення аномалій. Хоча результати демонструють високу точність, автори зазначають, що такі моделі вимагають значних обчислювальних ресурсів, що може бути обмеженням для їх впровадження в реальних інформаційно-комунікаційних мережах.

У роботі [3] розглядають використання машинного навчання для прогнозування стану систем та виявлення потенційних збоїв. Автори підкреслюють важливість підготовки якісних наборів даних для навчання моделей, оскільки це безпосередньо впливає на точність прогнозів.

Попри значний прогрес у застосуванні машинного навчання для моніторингу інформаційно-комунікаційних систем, залишаються наступні виклики:

– *обчислювальні ресурси* – глибокі нейронні мережі забезпечують високу точність, але вимагають значних обчислювальних ресурсів, що може бути недоступним у деяких середовищах;

– *підготовка даних* – якість та репрезентативність даних для навчання моделей є критично важливими, але часто є обмеження щодо доступності таких даних;

– *масштабованість* – адаптація моделей до великих мереж з високою динамікою трафіку залишається складним завданням.

З урахуванням згаданих викликів, у роботі запропоновано у якості основи моделі машинного навчання просту нейронну мережу, яка дає змогу спростити та прискорити процес навчання та не потребує значних обчислювальних ресурсів, що робить її придатною для впровадження в реальних інформаційно-комунікаційних мережах. Також

увагу зосереджено на покращенні наборів даних для збільшення ефективності навчання, оскільки дані, зібрані в реальних умовах, є гетерогенними, і знижують ефективність навчання.

Постановка завдання. Моніторинг інформаційно-комунікаційних систем є ключовим інструментом для забезпечення відмовостійкості, ефективності роботи мережі та високої якості користувацького досвіду. Системи моніторингу базуються на апаратних і програмних компонентах, що відслідковують та аналізують параметри програмно-апаратних систем, включно з мережним трафіком. У загальному вигляді методи моніторингу поділяються на активні та пасивні [4].

Активний моніторинг, який часто називають синтетичним, базується на створенні моделей, що імітують поточну поведінку мережі, замість використання реальних даних користувачів [5]. Такий підхід дозволяє виявляти потенційні проблеми до їх виникнення, оцінюючи продуктивність мережі в реальному часі. Однак цей метод потребує значних обчислювальних ресурсів, оскільки базується на складних алгоритмах і прогнозних моделях.

Пасивний моніторинг, у свою чергу, використовує реальні дані, які генеруються користувачами мережі, що дозволяє отримати цілісне уявлення про поточний стан мережі. Незважаючи на високу точність, цей підхід має обмеження – він не дозволяє прогнозувати проблеми, а лише виявляє ті, які вже сталися, і потребує негайного втручання [6].

Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки. Зокрема, активний моніторинг здатний передбачати аномалії, але залежить від точності передбачень і потребує більше ресурсів. У свою чергу пасивний моніторинг надає точні дані про поточний стан системи, але не дозволяє уникнути вже виниклих проблем [7].

У зв'язку зі стрімким зростанням обсягів мережного трафіку та кількості користувачів інформаційно-комунікаційних систем, перед системами моніторингу постають такі нові виклики: аналіз і зберігання великих обсягів даних; використання даних трафіку для бізнес-аналітики; інтеграція та безпека обробки даних; неоднорідність вхідних даних та необхідність уніфікації підходів до моніторингу [8].

Ці проблеми вимагають розробки нових підходів, які поєднують активні та пасивні методи моніторингу, і орієнтуються на застосування сучасних технологій, таких як машинне навчання. Одним із перспективних напрямів є предиктивний моніторинг, який дозволяє не лише аналізувати поточний стан мережі, але й прогнозувати мож-

ливі аномалії. Предиктивний моніторинг вузлів покликаний уникнути часової затримки, що виникає між подією та реакцією на подію. Добитися подолання часової затримки дозволяє наявність окремої, додаткової складової в системі моніторингу, що аналізує вхідні дані та в подальшому намагається визначити тенденцію зміни показників. Власне ця складова і створює таку подію як передбачення. Передбачення ($T_{\text{передбачення}}$) виникає раніше, ще до виникнення самої події ($T_{\text{події}}$). Таким чином, час реакції на подію в предиктивній системі можна описати формулою 1:

$$\Delta T = T_{\text{передбачення}} - T_{\text{події}} \quad (1)$$

де ΔT – це часовий інтервал між передбаченням події та її фактичною фіксацією.

Оскільки предиктивна система моніторингу працює на випередження, то спостерігаємо ситуацію, що, за нормальних умов роботи, часова затримка буде від'ємною, що означає виграш часу для реакції на подію ще до її виникнення. Тобто, що стосується самої події, момент її фіксації – це прогнозована із певною точністю величина, котра повинна передбачатися задля її уникнення. Використання машинного навчання у цьому контексті забезпечує автоматизацію процесу виявлення змін у стані системи та запобігає виникненню нештатних ситуацій.

Метою є розроблення та дослідження методу предиктивного моніторингу на основі машинного навчання, що дозволяє знизити ризики виникнення в інформаційно-комунікаційних системах аномалій за рахунок виявлення змін у стані системи до їхнього критичного впливу на систему. Пропонований підхід зосереджується на класифікації мережного трафіку з високою точністю при мінімальних обчислювальних витратах, а також на забезпеченні ефективної даних для навчання моделей.

Виклад основного матеріалу. У межах цієї статті використовується набір даних LUFLOW Network Intrusion Detection Data Set [9]. LUFLOW – це потоковий набір даних, створений і промаркований з урахуванням кореляції зловмисної активності, призначений для тренування моделей і виявлення потенційних вторгнень у систему. Дані отримано за допомогою мережної пастки (honeypots) – спеціальних вузлів або ресурсів, які слугують приманкою для залучення зловмисного трафіку. Метою використання мережної пастки є навмисне провокування виникнення аномалій для подальшого аналізу зібраного трафіку [9]. Для збору телеметрії в цих вузлах інформаційно-кому-

нікаційних систем застосовувався інструмент Cisco Joy.

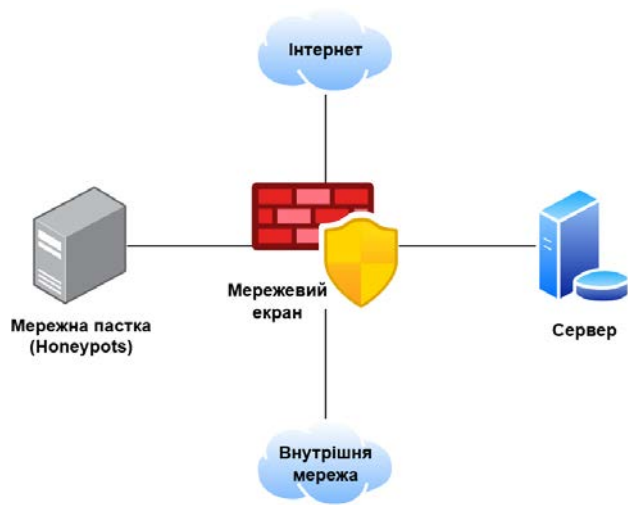


Рис. 1. Принцип застосування мережної пастки

Зібрані дані за допомогою інструментів Cisco промарковані в залежності від типу трафіку. Класів трафіку, представлених в наборі даних (табл. 1), всього 3. Перший клас має маркування benign, що позначає звичайний трафік в мережі. В свою чергу malicious – це аномальний трафік який вдалося виявити та маркувати. Але оскільки наявність вкидів в реальних інформаційно-комунікаційних системах є нормою [5], то в наборі даних представлений клас outlier, котрий не можна точно віднести ні до нормального, ні до зловмисного трафіку.

Таблиця 1

Приклади даних для кожного із класів

Параметр / Маркування	benign	malicious	outlier
src_ip	786	786	786
src_port	68		47613
dest_ip	786	786	786
dest_port	67		31306
protocol	17	1	6
bytes_in	0	8	0
bytes_out	600	8	0
numpktsin	0	1	0
numpktsout	2	1	1
entropy	1.615865	2.75	0.0
total_entropy	969.5192	43.99	0.0
duration	7.17	8.4e-5	0.0

Звертаючись до конкретних прикладів наведених у таблиці 1, варто зазначити, що так званий malicious приклад трафіку має різку відмінність у вигляді відсутності source port and destination port. Задля кращого розуміння набору даних

(табл. 2) варто звернутися до попарної кореляції за методом Пірсона та проаналізувати залежність параметрів (рис. 2).

Якщо опиратися на отримані показники попарної кореляції, то значення label сильно корелює із такими параметрами як: bytes out, destination port, destination ip, source port, source ip, total entropy. В свою чергу time_end та time_start є такими, що слабо корелюють з іншими параметрами. Параметри, що мають слабку кореляцію можна знехтувати у процесі навчання [10].

Процес налаштування параметрів нейронної мережі здійснено ітеративно, шляхом багаторазового тестування різних конфігурацій моделі. Це включало підбір оптимальної кількості шарів, нейронів, функцій активації та інших гіперпараметрів з метою досягнення балансу між точністю моделі та її складністю. Кожна ітерація базувалася на аналізі результатів попередніх, дозволяючи поступово вдосконалювати модель для забезпечення її стабільності та узгодженості з поставленими цілями.

avg_ip	1.00	0.02	0.00	-0.00	-0.01	0.04	0.01	0.01	-0.00	-0.01	0.01	0.00	-0.00	0.01	-0.03	0.00
bytes_in	0.02	1.00	0.43	-0.02	0.06	0.14	0.68	0.80	-0.01	-0.04	-0.05	0.00	-0.00	0.66	-0.09	0.30
bytes_out	0.00	0.43	1.00	-0.06	-0.12	0.02	0.61	0.49	-0.03	-0.16	0.13	0.00	-0.00	0.46	-0.33	0.22
dest_ip	-0.00	-0.02	-0.06	1.00	0.26	-0.01	-0.03	-0.03	0.14	-0.05	-0.27	0.00	0.00	-0.03	0.16	-0.01
dest_port	-0.01	0.06	-0.12	0.26	1.00	-0.15	-0.08	-0.10	-0.04	-0.24	-0.77	-0.00	0.00	-0.04	-0.32	-0.03
entropy	0.04	0.14	0.02	-0.01	-0.15	1.00	0.09	0.17	0.04	-0.00	0.12	0.00	0.00	0.24	-0.06	0.04
num_pkts_out	0.01	0.68	0.61	-0.03	-0.08	0.09	1.00	0.78	-0.02	-0.03	0.08	-0.00	-0.00	0.45	-0.07	0.33
num_pkts_in	0.01	0.80	0.49	-0.03	-0.10	0.17	0.78	1.00	-0.01	0.03	0.09	-0.00	-0.00	0.52	0.03	0.34
proto	-0.00	-0.01	-0.03	0.14	-0.04	0.04	-0.02	-0.01	1.00	0.04	-0.08	-0.00	-0.00	-0.01	0.06	0.00
src_ip	-0.01	-0.04	-0.16	-0.05	-0.24	-0.00	-0.03	0.03	0.04	1.00	0.22	-0.00	0.00	-0.07	0.43	0.00
src_port	0.01	-0.05	0.13	-0.27	-0.77	0.12	0.08	0.09	-0.08	0.22	1.00	-0.00	-0.00	0.06	0.21	0.02
time_end	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	1.00	0.33	0.00	-0.00	-0.00
time_start	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	0.33	1.00	0.00	0.00	0.00
total_entropy	0.01	0.66	0.46	-0.03	-0.04	0.24	0.45	0.52	-0.01	-0.07	0.06	0.00	0.00	1.00	-0.15	0.19
label	-0.03	-0.09	-0.33	0.16	-0.32	-0.06	-0.07	0.03	0.06	0.43	0.21	-0.00	0.00	-0.15	1.00	-0.01
duration	0.00	0.30	0.22	-0.01	-0.03	0.04	0.33	0.34	0.00	0.00	0.02	-0.00	0.00	0.19	-0.01	1.00
	avg_ip	bytes_in	bytes_out	dest_ip	dest_port	entropy	num_pkts_out	num_pkts_in	proto	src_ip	src_port	time_end	time_start	total_entropy	label	duration

Рис. 2. Попарна кореляція за Пірсоном

Таблиця 2

Опис параметрів набору даних

Назва параметра	Опис параметра
src_ip	Анонімізована IP-адреса джерела
src_port	Номер порту джерела
dest_ip	Анонімізована IP-адреса призначення
dest_port	Номер порту призначення
protocol	Номер протоколу за яким працює потік
bytes_in	Кількість байтів, переданих від джерела
bytes_out	Кількість байтів, переданих від призначення
numpktsin	Кількість пакетів даних від джерела до місця призначення
numpktsout	Кількість пакетів від пункту призначення до джерела
entropy	Ентропія в бітах на байт полів даних у потоці
total_entropy	Загальна ентропія в байтах за всіма байтами в полях даних потоку
mean_ip	Середнє значення міжпакетного часу прибуття потоку
duration	Час тривалості потоку з точністю до мікросекунди
label	Означення потоку. Розмітка

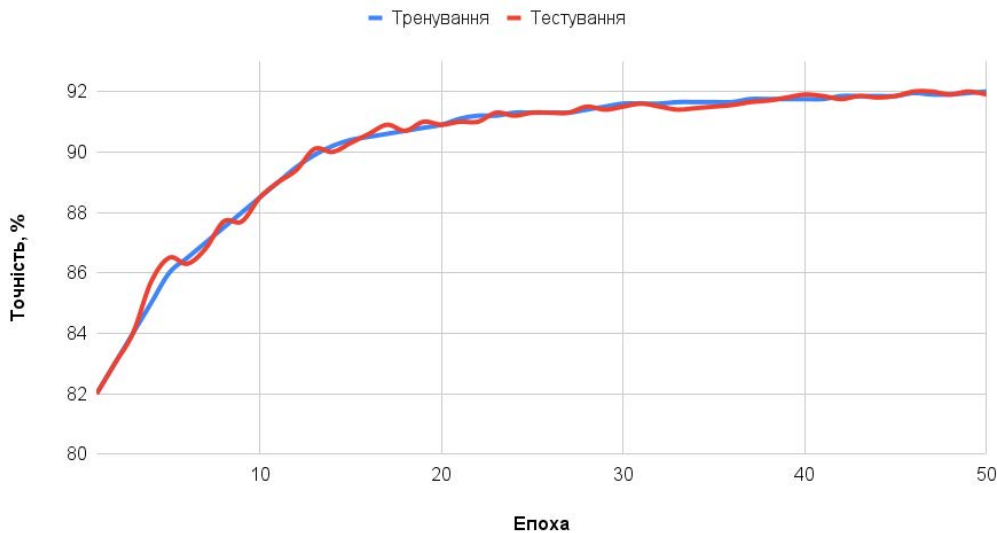


Рис. 3. Результати навчання та тестування моделі

Однак існує важлива проблема – оптимальні параметри, підібрані на етапі навчання моделі, не завжди гарантують таку ж точність під час роботи з реальними даними. Тому необхідно врахувати цей аспект і періодично повторювати процес навчання модель, адаптуючи її до змін даних з плином часу. Це основний недолік спеціалізованих моделей у порівнянні з доступними сьогодні узагальненими (GPT, Claude, тощо).

Проведені ітеративні дослідження дозволили визначити оптимальний баланс параметрів для нейронної мережі, що забезпечує точність прогнозування на рівні 92% (рис. 3).

Для забезпечення стабільного зростання точності протягом усіх епох навчання та уникнення вимикання нейронів при обробленні від'ємних значень було обрано функцію активації ELU. Крім того, для оптимізації процесу навчання використовувався оптимізатор Adamax, що показав високу ефективність у забезпеченні стабілізації і досягнення високої точності в процесі навчання моделі.

Модель має класичну каскадну структуру, де виходи нейронів одного шару є вхідними даними для наступного шару. Загальна кількість зв'язків між нейронами становить 12 707. Така конфігурація дозволила досягти балансу між складністю моделі та швидкістю її навчання.

Після завершення етапів навчання та тестування модель збережена для подальшого використання у задачах прогнозування. Крім того, її можна завантажити та продовжити навчання, що є критично важливим у контексті змінного характеру даних у інформаційно-комунікаційних системах. Такі зміни можуть включати перехід раніше нештат-

них ситуацій до класу нормальних, що зумовлює необхідність адаптації моделі до нових умов.

Таким чином, модель демонструє високу точність (92%) прогнозування, зберігаючи можливість подальшого вдосконалення для адаптації до реальних умов експлуатації. Це засвідчує перспективність подальшої роботи у використанні нейронної мережі для покращення роботи систем моніторингу. Слід зазначити, що результати є проміжними. Завдяки більш точному підбору параметрів нейронної мережі та зміні архітектури нейронної мережі, потенційно можливо досягти кращих показників на використаному в дослідженні наборі даних.

Висновки. У статті розроблено та досліджено метод предиктивного моніторингу інформаційно-комунікаційних систем на основі машинного навчання. Запропонована проста нейронна мережа продемонструвала високу точність класифікації мережного трафіку, досягаючи 92% при мінімальних обчислювальних витратах. Це робить модель придатною для впровадження в реальних інформаційно-комунікаційних мережах, де ресурси можуть бути обмеженими.

Аналіз набору даних LUFLOW дозволив виділити ключові параметри, що найбільше впливають на точність прогнозування. Використання функції активації ELU та оптимізатора Adamax забезпечило стабільну збіжність моделі та уникнення проблем, пов'язаних з обробкою від'ємних значень. Лінійна структура нейронної мережі з 12 707 зв'язками між нейронами дозволила досягти оптимального балансу між складністю моделі та швидкістю її навчання.

Важливим аспектом дослідження стало підкреслення необхідності регулярного перенавчання моделі для адаптації до змін у мережному трафіку, що є типовим для інформаційно-комунікаційних систем. Модель може бути завантажена та продовжена у навчанні, що забезпечує її гнучкість та довгострокову ефективність.

Результати дослідження підтверджують перспективність використання машинного навчання для

предиктивного моніторингу інформаційно-комунікаційних систем. Подальша робота може бути спрямована на оптимізацію параметрів моделі, експерименти з альтернативними архітектурами нейронних мереж та розширення наборів даних для підвищення точності та надійності прогнозування. Це відкриває можливості для більш ефективного керування мережами, підвищення їх відмовостійкості та якості обслуговування користувачів.

Список літератури:

1. Bian J., et al. Machine Learning in Real-Time Internet of Things (IoT) Systems: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Т. 9. № 11. С. 8364–8386. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3161050.
2. Liu M., Yang L. IoT Network Traffic Analysis with Deep Learning (Version 1) [Електронний ресурс]. arXiv. 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2402.04469>.
3. Li H., Wang X., Feng Y., Qi Y., Tian J. Driving intelligent IoT monitoring and control through cloud computing and machine learning [Електронний ресурс]. arXiv [cs.AI]. 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2403.18100>.
4. Faychuk V., Lavriv O., Stryhalyuk B., Shpur O., Demydov I., Bak R. Performance of routing algorithm remote operation in cloud environment for IoT devices. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2019. Т. 65. № 3. С. 367–373.
5. Lutsiv N., Maksymyuk T., Beshley M., Lavriv O., Andrushchak V., Sachenko A., Vokorokos L., Gazda J. Deep semisupervised learning-based network anomaly detection in heterogeneous information systems. *Computers, Materials & Continua*. 2022. Т. 70. № 1. С. 413–431.
6. Abbasi M., Shahraki A., Taherkordi A. Deep learning for network traffic monitoring and analysis (NTMA): A survey. *Comput. Commun.* 2021. Т. 170. С. 19–41.
7. Kurt B., Zeydan E., Yabas U., Karatepe I. A., Kurt G. K., Cemgil A. T. A Network Monitoring System for High Speed Network Traffic. 2016 13th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON). London, UK, 2016. С. 1–3. DOI: 10.1109/SAHCN.2016.7732965.
8. Lotfollahi M., Shirali hossein zade R., Jafari Siavoshani M., Saberian M. Deep Packet: A Novel Approach For Encrypted Traffic Classification Using Deep Learning. *Soft Computing*. 2020. Т. 24. DOI: 10.1007/s00500-019-04030-2.
9. Mills R. LUFLOW Network Intrusion Detection Data Set [Електронний ресурс]. Kaggle. 2023. URL: <https://doi.org/10.34740/KAGGLE/DSV/6403282>.
10. Sahay R., Geethakumari G., Modugu K., Mitra B. Traffic Convergence Detection in IoT LLNs: A Multilayer Perceptron based Mechanism. 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Bangalore, India, 2018. С. 1715–1722. DOI: 10.1109/SSCI.2018.8628921

Lutsiuk A.V. PREDICTIVE MONITORING OF INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS USING A SPECIALIZED MACHINE LEARNING MODEL

Modern information and communication systems, particularly Internet of Things (IoT) networks, are characterized by rapidly increasing complexity due to the growing number of connected devices and network traffic volumes. This presents significant challenges for traditional monitoring and management methods, which often fail to provide the required levels of stability, security, and quality of service (QoS) due to their limited capacity to process large amounts of data in real time. Consequently, there is a pressing need for innovative approaches capable of predicting potential issues in information and communication networks before they occur.

This study develops and examines a method for predictive monitoring of information and communication systems and networks based on a machine learning approach. A specialized model is proposed, capable of delivering high prediction accuracy while requiring a relatively small number of parameters. The core of the model is a simple neural network, which simplifies the training process and does not demand significant computational resources, making it suitable for deployment in real-world network devices with limited resources. The LUFLOW dataset, containing labeled information on network traffic collected through specialized monitoring and capture tools, was utilized to train the model.

The research involved analyzing key parameters influencing prediction accuracy, such as incoming and outgoing traffic volumes, port numbers, and source and destination IP addresses. The use of ELU activation functions and the Adamax optimizer ensured a stable training process and high classification accuracy, reaching 92%. These results confirm the effectiveness of the proposed approach for predictive monitoring in information and communication systems.

The findings demonstrate the potential of machine learning in predicting the states of information and communication systems. The proposed model not only detects known anomalies in real time but also forecasts the occurrence of new ones based on historical monitoring data, thereby improving network resilience and enhancing user quality of service. Future studies may focus on optimizing the neural network architecture and expanding the dataset to increase the model's accuracy and versatility.

Key words: monitoring system, predictive monitoring, information and communication system, machine learning, neural network.

Петровський А.А.

незалежний дослідник

СЕГМЕНТАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БІНАРНОГО ДЕРЕВОПОДІБНОГО НАЇВНОГО БАЄСА

Данна стаття містить покращений алгоритм сегментації супутникових знімків, які були отримані за допомогою супутників місії Sentinel-2. Для створення рішення по сегментації зображень було проаналізовано актуальні методи сегментації. Як результат, було запропоновано використати метод, який базується на основі класифікатора Наївного Баєса.

Перевагою цього метода є те, що він не потребує значних обчислюваних потужностей та може використовуватися в режимі реального часу, що дозволяє його використовувати з відеопотоками. Було проаналізовано мультикласовий класифікатор, в результаті якого точність розпізнавання становить для 89%. Для покращення точності мультикласового класифікатора було вирішено використати бінарний деревоподібний класифікатор для збільшення точності сегментації, який поділяє мультикласовий класифікатор на послідовність бінарних класифікаторів. Автором було візуально зображено гістограми ймовірностей приналежностей для кожного з класів для обох класифікаторів та графік модуля абсолютної різниці між реальною кількістю пікселів та отриманою сегментатором для кожного з класів. Такий підхід дозволяє ефективніше розподіляти класи і точніше виділяти межі між різними об'єктами.

У результаті було отримано збільшення точності сегментації з 89% до 94%, що свідчить про надійність та ефективність запропонованого методу для конкретних застосувань у моніторингу природних ресурсів. Саме дослідження базувалося на таких категоріях: ліс, поле, вода, місто. У роботі також автор показав візуальне приклад візуального представлення результату розпізнавання для мультикласового та бінарного деревоподібного наївного Баєса поруч з реальним супутниковим знімком адаптованим до RGB. Основним недоліком методу є велика кількість ітерацій, необхідних для остаточного визначення приналежності до кожної категорії, а також скорочення даних для навчання на кожному наступному етапі ітерації. Вирішення цих проблем може ще краще покращити точність розпізнавання. В подальших дослідженнях планується вирішити цю проблему.

Ключові слова: сегментація, машинне навчання, Наївний Байєс, Sentinel-2, класифікація, супутникові знімки, бінарний класифікатор.

Постановка проблеми. Сегментація зображень відіграє ключову роль в розумінні та інтерпретації візуальних даних та може використовуватися у різних сферах. Із швидким розвитком супутникової техніки з'явилася можливість отримувати зображення високої якості планети в режимі реального часу, що робить сегментацію супутникових знімків однією з найбільш актуальних задач сучасності.

Супутникові знімки, особливо отримані від супутника Sentinel-2, надають неймовірну можливість аналізу земних поверхонь завдяки їх високій частоті оновлення та високій просторовій роздільній здатності. На відміну від звичайних оптичних зображень, Sentinel-2 забезпечує дані в різних спектральних діапазонах, що розширює можливість для детектування та класифікації різних об'єктів на поверхні Землі. Даний метод сегментації може використовуватися для таких цілей як: виявлення повеней та пожеж, моніторинг полів та врожайності і т.д. [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасні методи дослідження базуються в основному на згорткових нейронних мережах таких як: U-Net, SegNet та DeepLab. У роботі розглядається сегментація за допомогою нейронної мережі на базі U-Net для визначення сегментації сільськогосподарських угідь. У статті пропонується метод картографування рисових полів, який об'єднує сегментацію супутникових зображень високої роздільної здатності для визначення меж сільськогосподарських полів з класифікацією по пікселях на основі даних Sentinel-1. Точність даної моделі становить 95% [2].

Інший варіант використання архітектура семантичної сегментації, побудована з використанням механізму уваги (attention mechanism), яка спрямована на покращення точності та деталізації картографування сільськогосподарських культур на знімках Sentinel-2.

Базується архітектура на моделі, подібній до U-Net, з додаванням модулів уваги, які фокусу-

ються на важливих ділянках зображення, полегшуючи виділення дрібних деталей. Застосування модулів уваги дозволяє нейронній мережі акцентувати увагу на більш актуальних пікселях, що робить сегментацію більш точною [3].

Метою статті є розробка алгоритму сегментації на основі деревоподібного Наївного Баєса, що буде забезпечувати такі характеристики:

- Відносно висока швидкість навчання
- Покращена точність сегментації порівняно з стандартною мультикласовою сегментацією

Виклад основного матеріалу дослідження.

У таблиці 1 наведено канали, з яких складаються знімки для Sentinel-2 та їх основні характеристики [4].

Таблиця 1
Основні шари супутникового знімку Sentinel-2

Канал	Діапазон (нм)	Розмір пікселя (м)	Основне застосування
B1	0.443	60	Аерозольні умови
B2	0.490	10	Синій
B3	0.560	10	Зелений
B4	0.665	10	Червоний
B5	0.705	20	Червоний край
B6	0.740	20	Червоний край
B7	0.783	20	Червоний край
B8	0.842	10	Ближній інфрачервоний
B8A	0.865	20	Червоний край
B9	0.945	60	Водяний пар
B10	1.375	60	Водяний пар
B11	1.610	20	Середній інфрачервоний
B12	2.190	20	Середній інфрачервоний

Дане дослідження базується на завданні сегментації, яка буде розділяти супутниковий знімок на чотири основні категорії: ліси, міста, поля, вода. Як зазначено в таблиці вище – кожне зображення в датасеті має 12 каналів, що відображають різноманітні спектральні характеристики земної поверхні. Завдяки тому, що для кожного пікселя міститься 12 каналів, в порівнянні зі звичними 3 для RGB зображень є можливість отримати більш деталізовану інформацію про кожну конкретну ділянку земної поверхні.

Наївний Байєс є моделлю умовної ймовірності, яка визначає ймовірності $p(C_k|x_1, \dots, x_n)$ для кожного з K можливих результатів або класів C_k даної проблеми, яка має бути класифікована, представленій вектором $x = (x_1, \dots, x_n)$, що включає декілька n ознак, як незалежні змінні. Застосовуючи теорему Байєса, умовну ймовірність можна представити як:

$$p(C_k | x) = \frac{p(C_k) p(x | C_k)}{p(x)}$$

Формула 1. Формула умовної ймовірності

де

$p(C_k)$ – це ймовірність спостереження набору ознак x за умови, що об’єкт належить до класу C_k , $p(x | C_k)$ – апіорна ймовірність класу C_k , тобто ймовірність того, що довільно вибраний об’єкт належить до класу C_k , до того, як було враховано ознаки об’єкта,

$p(x)$ – ймовірність спостереження набору ознак x незалежно від класу [5].

На практиці, нас цікавить лише чисельник цього дробу, оскільки знаменник не залежить від C та значення ознак x_i є заданими, тому знаменник є фактично сталим. Чисельник еквівалентний спільній ймовірнісній моделі $p(C_k, x_1, \dots, x_n)$, яка може бути переписана наступним чином, використовуючи правило ланцюга для повторного застосування визначення умовної ймовірності:

$$p(C_k, x_1, \dots, x_n) = p(x_1, \dots, x_n, C_k) = p(x_1|x_2, \dots, x_n, C_k) p(x_2, \dots, x_n, C_k) = \\ = p(x_1|x_2, \dots, x_n, C_k) p(x_2|x_3, \dots, x_n, C_k) p(x_3, \dots, x_n, C_k) = \\ = p(x_1|x_2, \dots, x_n, C_k) p(x_2|x_3, \dots, x_n, C_k) \dots p(x_{n-1}|x_n, C_k) p(x_n|C_k) p(C_k)$$

Формула 2. Чисельник умовної ймовірності

Враховуючи, що в наївному Баєсі всі ознаки є взаємно незалежними, то можна записати: $p(x_i|x_{i+1}, \dots, x_n, C_k) = p(x_i|C_k)$

Тоді, загальну ймовірнісну модель можна написати:

$$p(C_k|x_1, \dots, x_n) \propto p(C_k, x_1, \dots, x_n) = p(C_k) p(x_1, \dots, x_n) = \\ = p(C_k) p(x_1|C_k) p(x_2|C_k) p(x_3|C_k) \dots \\ = p(C_k) \prod_{i=1}^n p(x_i|C_k)$$

Формула 3. Загальна ймовірнісна модель

де \propto означає пропорційність, оскільки знаменник $p(x)$ опущений.

Це означає, що за вищезазначеними припущеннями незалежності, умовний розподіл за класовою змінною C є таким:

$$p(C_k|x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{Z} p(C_k) \prod_{i=1}^n p(x_i | C_k)$$

Формула 4. Умовний розподіл за класом C

де $Z = p(x) = \sum_k p(C_k) p(x|C_k)$ є масштабуючим коефіцієнтом, що залежить лише від x_1, \dots, x_n , тобто є константою, якщо значення змінних ознак відомі [6].

Те що наведено вище і є наївною баєсівською ймовірнісною моделлю. Для створення класифікатора необхідно цю модель поєднати з правилом прийняття рішень. Одне з поширених правил – вибрати гіпотезу, яка найбільш імовірна, щоб мінімізувати ймовірність помилкової класифікації.

фікації; це відомо як правило прийняття рішення за максимумом апостеріорної ймовірності або MAP-правило. Відповідний класифікатор, баєсівський класифікатор, – це функція, яка присвоює мітку класу $\hat{y} = C_k$ для деякого k наступним чином:

$$\hat{y} = \operatorname{argmax}_{k \in \{1, \dots, K\}} p(C_k) \prod_{i=1}^n p(x_i | C_k)$$

Формула 5. Баєсівський класифікатор для k класів

Апріорна ймовірність класу може бути обрахована шляхом припущення про рівні ймовірності класів, $p(C_k) = \frac{1}{K}$, або шляхом розрахунку оцінки ймовірності класу з навчального набору:

$$\text{апріорна ймовірність} = \frac{\text{кількість зразків у класі}}{\text{загальна кількість}}$$

Формула 6. Апріорна ймовірність

При роботі з неперервними даними зазвичай припускають, що вони є пов'язані з кожним класом та розподілені відповідно до нормального (або гаусівського) розподілу. Наприклад, припустимо, що навчальні дані містять неперервний атрибут x . Дані спочатку сегментуються за класами, а потім для кожного класу обчислюються середнє значення x та його дисперсія. Нехай μ_k буде середнім значенням x , асоційованим з класом C_k , а σ_k^2 буде дисперсією, скоригованою за Бесселем, для значень x , що асоціюються з класом C_k [7]. Припустимо, що було зібрано деяке спостережуване значення v . Тоді щільність ймовірності v , за умови належності до класу C_k тобто $p(x = v | C_k)$, може бути обчислена шляхом підстановки v у формулу нормального розподілу, параметризовану середнім μ_k та дисперсією σ_k^2 . Формально, це виражається як:

$$P(x = v | C_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Формула 7. Формула Гаусівського розподілу

Підставивши формулу 5 у формулу 7, отримаємо:

$$\hat{y} = \operatorname{argmax}_{k \in \{1, \dots, K\}} p(C_k) \prod_{i=1}^n p(x_i | C_k) = \operatorname{argmax}_{k \in \{1, \dots, K\}} p(C_k) \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Формула 8. Загальна формула модель гаусівського наївного баєсівського класифікатора

Дана формула показує математичну модель гаусівського наївного баєсівського класифікатора [8].

У результаті проведеного дослідження з вказаним вище датасетом модель показала загальну точність 89%.

Нижче можна побачити гістограму ймовірностей приналежності до класів та графік модуля різниці між очікуваним та отриманим значеннями.

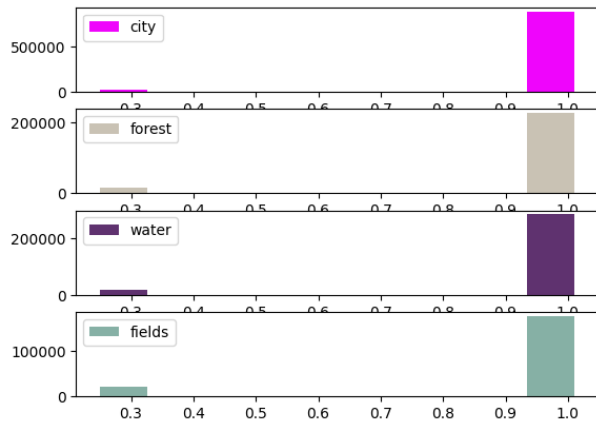


Рис. 1.1. Гістограма ймовірностей мультикласового класифікатора

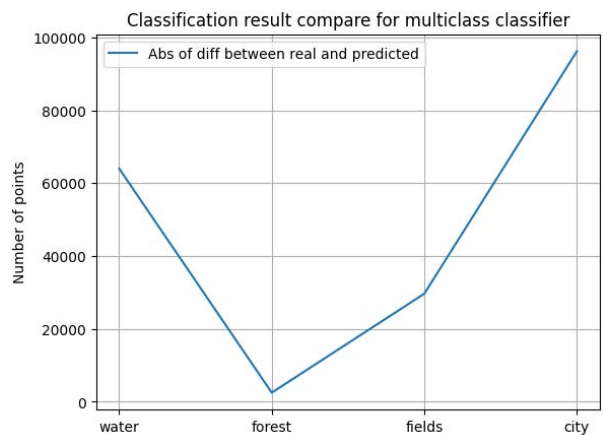


Рис. 1.2. Модуль різниці мультикласового класифікатора між очікуваним та реальним

Проаналізувавши ці дані, можна побачити, що вода, ліс та пісок розпізнаються найкраще. Найбільше проблем є саме з полем та містом. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано використати замість мультикласової класифікації метод ієрархічної деревоподібного Баєса.

Такий підхід передбачає послідовне відсіювання категорій на кожному етапі, що дозволяє ефективно використовувати інформацію з попередніх етапів класифікації для уточнення рішення на наступних етапах.

Центральною ідеєю такого підходу є те, що прийняття рішення про належність до певної категорії відбувається на основі ряду послідовних тестів. Якщо на початковому етапі даний об'єкт не проходить перевірку на належність до певної загальної категорії, він помічається як, наприклад, «не вода» і помічається на те, щоб пройти на наступну ітерацію. В іншому випадку, даний об'єкт записується як «вода» і більше не враховується в наступних ітераціях. Нижче на рисунку можна побачити схематичне зображення вигляду цього алгоритму.

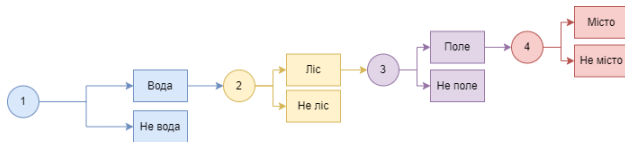


Рис. 2. Схематичне зображення деревоподібного бінарного класифікатора

Якщо говорити про математичне обґрунтування, то для математичного обрахунку потрібно буде використати рекурентний підхід, оскільки кожна наступна ітерація буде залежати від попередньої:

Тоді загальну ймовірність приналежності до класу можна описати:

$$p(C_{k,m}|x_1, \dots, x_{n_m}) \propto p(C_{k,m}) \prod_{i=1}^{n_m} p(x_i | C_{k,m}) \tilde{p}(C_{k,m-1}|x_1, \dots, x_{n_{m-1}})$$

Формула 9. Рекурентна формула обчислення ймовірності

Отже, загальна формула класифікатора матиме вигляд:

$$\hat{y}_m = \operatorname{argmax}_{k \in \{1, \dots, K\}} p(C_{k,m}) \prod_{i=1}^{n_m} p(x_i | C_{k,m}) = \operatorname{argmax}_{k \in \{1, \dots, K\}} \prod_{i=1}^{n_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{(x_i - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2}} y_{m-1}$$

Формула 10. Загальна формула бінарного деревоподібного класифікатора

Як видно з формули, що кожна наступна ітерація залежить від попередньої та буде враховувати ймовірність не приналежності до батьківського класу. Важливим аспектом цього підходу є те, що ймовірності на одному рівні дерева залежать від результатів попереднього рівня. Тобто, для отримання ймовірності належності даних до певної категорії на третьому рівні, наприклад, потрібно спершу визначити ймовірності на другому та першому рівнях. І загальна ймовірність приналежності до певної категорії буде добуток всіх ймовірностей по цьому дереву.

Графічно така модель може бути представлена у вигляді дерева, де корінь символізує початковий етап розпізнавання, а гілки – подальші ітерації. На кожному рівні дерева можливе розділення на два піддерева, що відображають рішення моделі про категорію даних.

Ці обмеження ускладнюють інтерпретацію результатів та візуалізацію гістограм ймовірностей.

У результаті досліджень та експериментальних перевірок було виявлено, що впровадження ієрархічної моделі у вигляді бінарного дерева дозволяє значно підвищити ефективність класифікації. Порівняно з традиційним підходом, де точність склала 89%, ієрархічна модель продемонструвала покращення точності до 94%. Нижче показана гістограма ймовірностей класифікації за допомогою ієрархічного бінарного дерева.

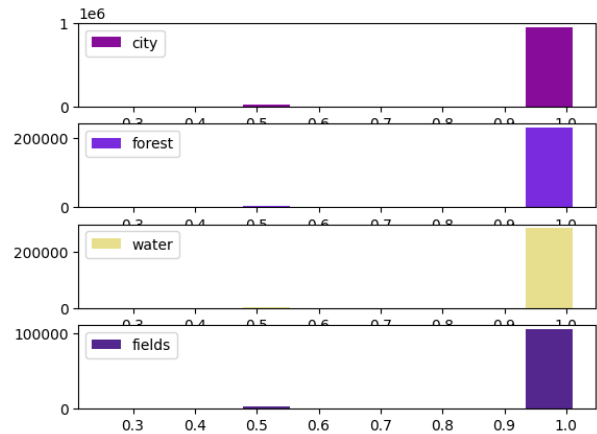


Рис. 3.1. Гістограма ймовірностей бінарного деревоподібного класифікатора

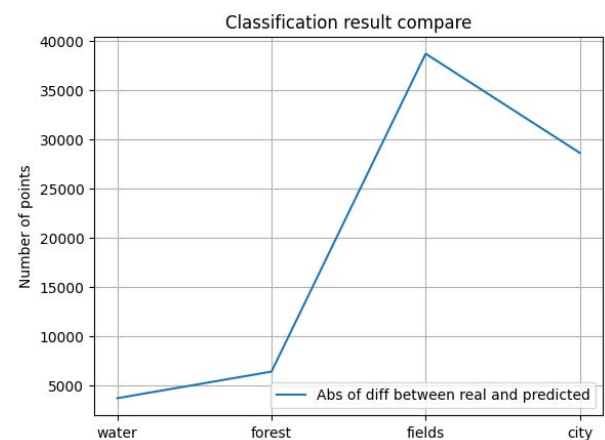


Рис. 3.2. Модуль різниці бінарного деревоподібного класифікатора між очікуваним та реальним

Порівнявши обидві гістограми, можна побачити, що для звичайного мультикласового класифікатора є певна кількість даних, ймовірність приналежності до класу в яких коливається в значеннях 20%–30%. В свою чергу, для бінарного – є певна кількість, ймовірність, яких є близько 50%, але їх кількість є набагато меншою. Це свідчить про те, що деревоподібний класифікатор є більш точним. Така різниця у 2.5 рази показує ефективність цього підходу.

Нижче також можна побачити розпізнавання супутникового знімка за допомогою багатокласового класифікатора, бінарного ієрархічного та зображенням адаптованим до RGB.

Висновки. Деревоподібний бінарний класифікатор показав себе ефективнішим за класичний підхід з багатокласовою класифікацією. Завдяки цій ієрархічній моделі точність класифікації зросла з 89% до 94%. Порівняння гістограм для обох підходів (класичний та деревоподібний) показало, що розподіл ймовірностей в деревоподібному класифікаторі

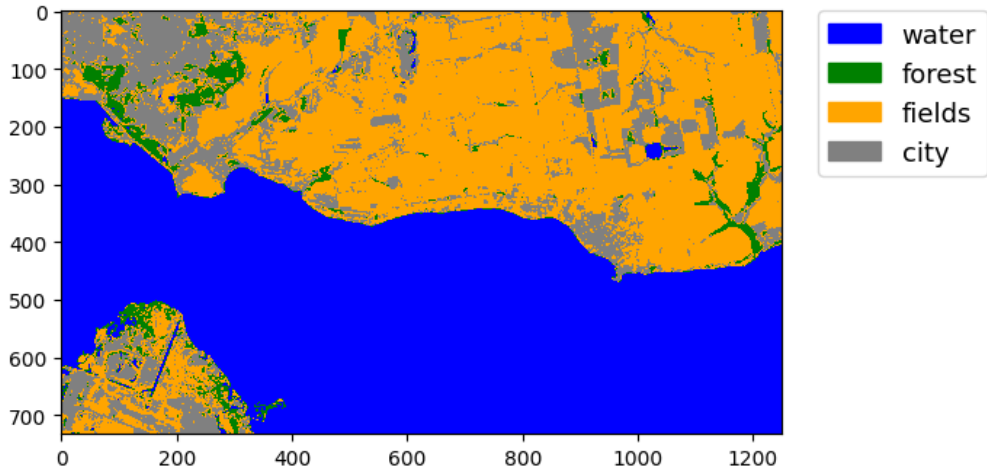


Рис. 4. Результат сегментації за допомогою бінарного деревоподібного класифікатора

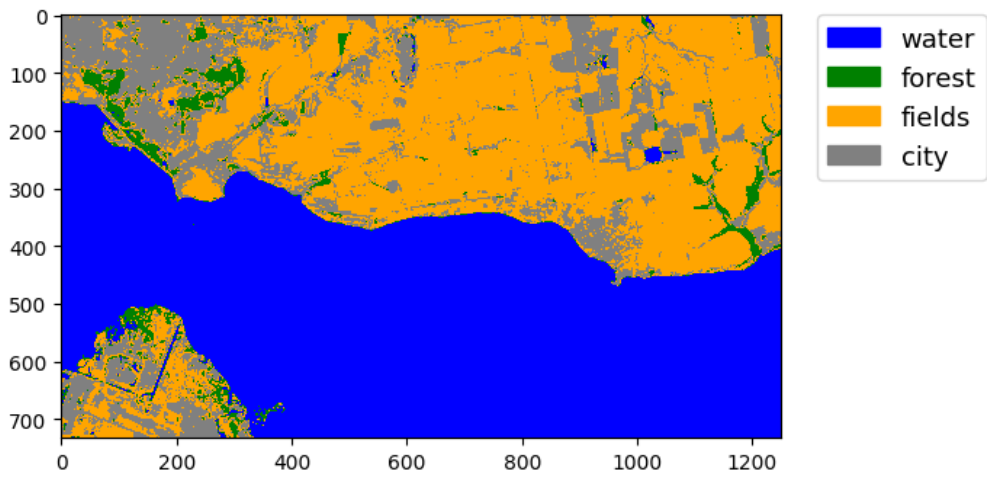


Рис. 5. Результат сегментації за допомогою мультикласового класифікатора



Рис. 6. Оригінальне зображення

є більш визначеним. Тобто, замість розподілених ймовірностей між класами в класичному підході, деревоподібний підхід демонструє більшу точність у приналежності пікселів до конкретних категорій. Такий підхід може бути корисним не тільки для задач сегментації супутникових зображень, але й у інших областях, де важливо чітко розрізнити різні категорії на основі складних або характеристик, що можуть перекриватися між собою.

Однією з основних проблем запропонованого підходу є те, що складність моделі зростає пропорційно кількості класів. Це може призвести до значного збільшення обчислювальних ресурсів та часу навчання моделі, особливо при наявності великої кількості класів. Існує ризик, що деяка

важлива інформація може бути втрачена або ігнорована при відсіюванні даних на попередніх етапах розпізнавання. У подальшому дослідженні пропонується також розглянути підхід з використанням паралельного бінарного класифікатора, де для кожного класу розпізнавання буде виконуватися окремо, і потім обробляти ці результати, а також використання гібридного методу з увімкненням навчання з вчителем.

Отже, бінарний деревоподібний класифікатор пропонує новий спосіб підходу до багатокласової класифікації, який може поліпшити точність сегментації, що дасть змогу використовувати даний метод замість тих, які потребують значних обчислювальних потужностей.

Список літератури:

1. Sentinel-2: Satellite Imagery, Overview, And Characteristics. EOS Data Analytics. URL: <https://eos.com/find-satellite/sentinel-2/>. (дата звернення: 21.11.2024).
2. Agricultural Field Boundary Delineation with Satellite Image Segmentation for High-Resolution Crop Mapping: A Case Study of Rice Paddy / M. Wang та ін. *Agronomy*. 2022. Т. 12, № 10. С. 2342. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102342> (дата звернення: 18.11.2024).
3. Gao M., Lu T., Wang L. Crop Mapping Based on Sentinel-2 Images Using Semantic Segmentation Model of Attention Mechanism. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 15. P. 7008. URL: <https://doi.org/10.3390/s23157008>.
4. Sentinel-2 Bands. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/bands/> (дата звернення: 18.11.2024).
5. McCallum A., Nigam K. A comparison of event models for naive bayes text classification. *AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 1998. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7311285>.
6. Murty M. N., Devi V. S. *Pattern Recognition: An Algorithmic Approach*. Springer, 2011.
7. Caruana R., Niculescu-Mizil A. An empirical comparison of supervised learning algorithms. *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*. New York, NY, USA, 2006. С. 161–168. URL: <https://doi.org/10.1145/1143844.1143865>.
8. John G. H., Langley P. Estimating Continuous Distributions in Bayesian Classifiers. *CoRR*. 2013. Abs/1302.4964. URL: <http://arxiv.org/abs/1302.4964>.

Petrovskiy A.A. SEGMENTATION OF SATELLITE IMAGES USING A BINARY TREE-BASED NAIVE BAYES CLASSIFIER

This article presents an improved algorithm for satellite image segmentation using data obtained from the Sentinel-2 mission. To develop the segmentation solution, current segmentation methods were analyzed. As a result, a method based on the Naïve Bayes classifier was proposed.

The advantage of this method lies in its low computational requirements, allowing real-time usage, including processing video streams. A multiclass classifier was analyzed, achieving a recognition accuracy of 89%. To improve the accuracy of the multiclass classifier, a binary tree-based classifier was employed, dividing the multiclass problem into a sequence of binary classifications. The author visually represented histograms of class membership probabilities for each classifier and a graph of the absolute difference between the real pixel counts and those predicted by the segmenter for each class. This approach enables more effective class distribution and more precise delineation of boundaries between objects.

As a result, the segmentation accuracy increased from 89% to 94%, demonstrating the reliability and efficiency of the proposed method for specific applications in natural resource monitoring. The study focused on the following categories: forest, field, water, and city. Additionally, the author provided a visual representation of the recognition results for both the multiclass and binary tree-based Naïve Bayes classifiers, compared alongside the real satellite image adapted to RGB. The main drawback of the method is the high number of iterations required for final classification into all categories and the reduced training data for each subsequent iteration step. Addressing these issues could further improve recognition accuracy. Future research aims to resolve these challenges.

Key words: *segmentation, machine learning, Naïve Bayes, Sentinel-2, classification, satellite images, binary classifier.*

УДК 616.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/24>**Саражинський В.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лебедев Д.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Антонюк О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ ВЕРИФІКАЦІЇ, ЯКИЙ ҐРУНТУЄТЬСЯ НА РАНДОМІЗАЦІЇ З ОБМЕЖЕННЯМИ, ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ БЛОКУ DMA СИНТЕЗОВАНОГО МОВАМИ ОПИСУ АПАРАТУРИ

Стаття присвячена розробці та реалізації алгоритму верифікації блоку Direct Memory Access (DMA), що є критично важливим компонентом у сучасних цифрових системах. У статті розкрито значення верифікації як одного з ключових етапів у розробці електронних систем для забезпечення їхньої надійності, відповідності технічним вимогам і уникнення помилок на етапах виробництва. Особливу увагу приділено DMA-контролерам, які відповідають за передачу даних між пам'яттю та периферійними пристроями без участі центрального процесора. Некоректна робота таких компонентів може спричинити втрати даних, зниження продуктивності та нестабільність системи, що обумовлює необхідність ефективної верифікації.

В ході статті визначено мету дослідження – реалізацію алгоритму верифікації блоку DMA на основі рандомізації з обмеженнями для перевірки функціональності та відповідності специфікаціям. З'ясовано, що ключовими етапами процесу верифікації є створення верифікаційного плану, розробка тестового середовища, створення тестів, проведення симуляцій, збір функціонального покриття та аналіз результатів. У роботі також розкрито методику побудови верифікаційного середовища, яке використовує компоненти Universal Verification Methodology (UVM) для забезпечення максимальної гнучкості та ефективності тестування.

Розкрито основні аспекти реалізації алгоритму верифікації, включаючи створення тестових послідовностей, інтеграцію верифікаційних модулів, а також аналіз результатів функціонального покриття. Верифікація була проведена для модуля АНВ DMA Controller з відкритим кодом, що використовує АНВ-Lite інтерфейси. У результаті досягнуто функціонального покриття на рівні 95%, що підтверджує ефективність запропонованого алгоритму та верифікаційного середовища.

З'ясовано, що однією з причин недосягнення 100% покриття є ймовірні баги в дизайні, що потребують подальшого вдосконалення. Визначено перспективи розвитку, які включають оптимізацію алгоритму рандомізації, розширення тестових сценаріїв для досягнення 100% покриття, а також інтеграцію нових перевірок для більш детального тестування.

Запропонований метод демонструє високу гнучкість, що дозволяє адаптувати його до різних умов тестування та застосовувати для верифікації інших компонентів цифрових систем. Результати дослідження можуть бути корисними для інженерів у сфері розробки апаратного забезпечення, забезпечуючи стабільну роботу сучасних цифрових систем.

Ключові слова: верифікація, DMA, рандомізація з обмеженнями, функціональне покриття, тестове середовище.

Постановка проблеми. Верифікація цифрових мікросхем є ключовим етапом у розробці сучасних електронних систем, оскільки забезпечує відповідність дизайну технічним вимогам та запобігає появі помилок на пізніх стадіях вироб-

ництва. У випадку DMA (Direct Memory Access) контролерів, які відповідають за передачу даних між пам'яттю та периферійними пристроями без втручання центрального процесора, забезпечення їхньої коректної роботи є критично важливим

завданням. DMA блокується помилками дизайну, що може призводити до некоректної роботи системи чи виникнення часових збоїв. Некоректна робота DMA може призвести до серйозних проблем в системі, таких як втрати даних, зниження продуктивності та нестабільність роботи. Тому розробка ефективних алгоритмів верифікації блоку DMA є важливою задачею для забезпечення надійності та стабільності цифрових систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В даному розділі описано загальний алгоритм верифікації цифрових мікросхем [2]. Даний алгоритм може змінюватись та доповнюватись в залежності від складності мікросхеми. Блок-схему алгоритму наведено на рисунку 1.

1. Створення верифікаційного плану

Першим кроком у процесі верифікації є підготовка плану верифікації, який тісно пов'язаний зі специфікацією проекту.

Верифікаційний план включає тест-план (список тестових сценаріїв, спрямованих на особливості дизайну), планування функціонального покриття, призначення модулів/блоків інженерам з верифікації. План верифікації також передбачає планування повторного використання компонентів верифікації під час перевірки на рівні системи.

2. Розробка тестового середовища

У рамках розробки тестового середовища інженери з верифікації розробляють компоненти верифікаційного середовища, інтерфейси для з'єднання тестового середовища з дизайном, інтегрують готові верифікаційні блоки (VIPs) в загальне середовище, розробляють модулі контролю (checkers) тощо.

3. Створення тестів

На даному етапі створюються рандомізовані або спеціальні тести написані для однієї чи кількох функцій у дизайні у відповідності до тест-плану. Тести запускають послідовності на основі UVM для симуляції необхідних сценаріїв.

4. Симуляція

На цьому етапі інженери перевіряють, чи верифікована певна функція чи ні. Якщо ні, знову змінюються тестові послідовності та ще раз запускається симуляція. За допомогою модулю сповіщення (scoreboard) повідомляється про помилку, якщо бажаний дизайн не працює належним чином. В результаті аналізу помилок та часових діаграм сигналів оцінюється середовище верифікації та повідомляється про помилку команді проектувальників, якщо виявилось, що це проблема дизайну, інакше моделювання запускається повторно після виправлення помилок верифікаційного середовища.

5. Збір покриття

Наступним важливим кроком є збір функціонального покриття. Це вирішальний етап, оскільки на цьому етапі вирішується чи достатньо верифіковано функції мікросхеми (досягнуто необхідного відсотку покриття).

6. Аналіз покриття та доповнення тестів

Аналізуючи покриття нерідко виникає необхідність додавання спеціальних тестів або запуску багатьох тестів регресивно.

Процес верифікації завершується при досягненні 100% покриття, або якщо це неможливо чи займатиме забагато часу – при досягненні відсотку покриття не меншого ніж зазначено в специфікації.

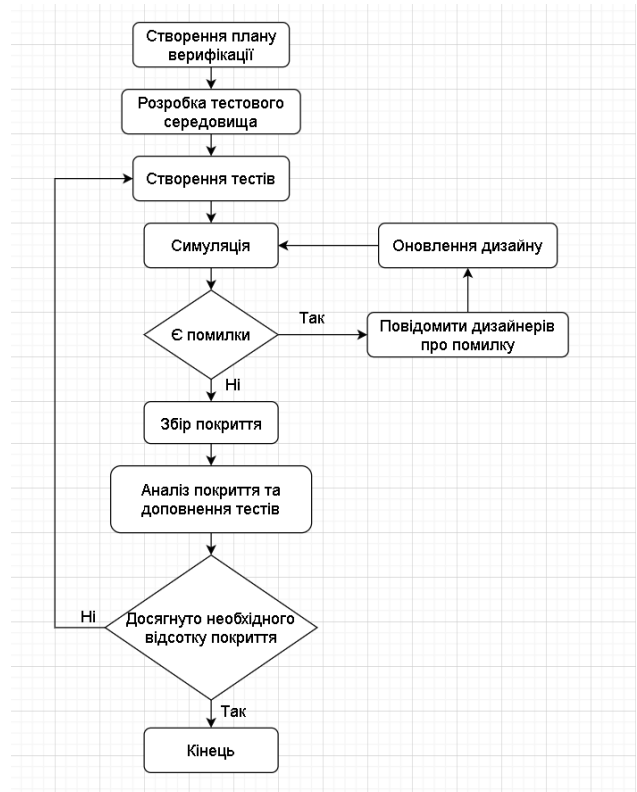


Рис. 1. Блок-схема алгоритму верифікації

Постановка завдання. Метою даної роботи є реалізація алгоритму верифікації блоку DMA, заснованого на рандомізації з обмеженнями, для перевірки його функціональності та відповідності специфікаціям. Основні завдання включають:

1. Реалізація алгоритму верифікації, що використовує рандомізацію з обмеженнями.
2. Створення верифікаційного середовища.
3. Проведення верифікації блоку DMA та аналіз досягнутого функціонального покриття.

Виклад основного матеріалу. У якості DMA блоку використовується модуль АНВ DMA Controller [3] з відкритим кодом написаним мовою Verilog. Цей модуль створений на основі АНВ-Lite

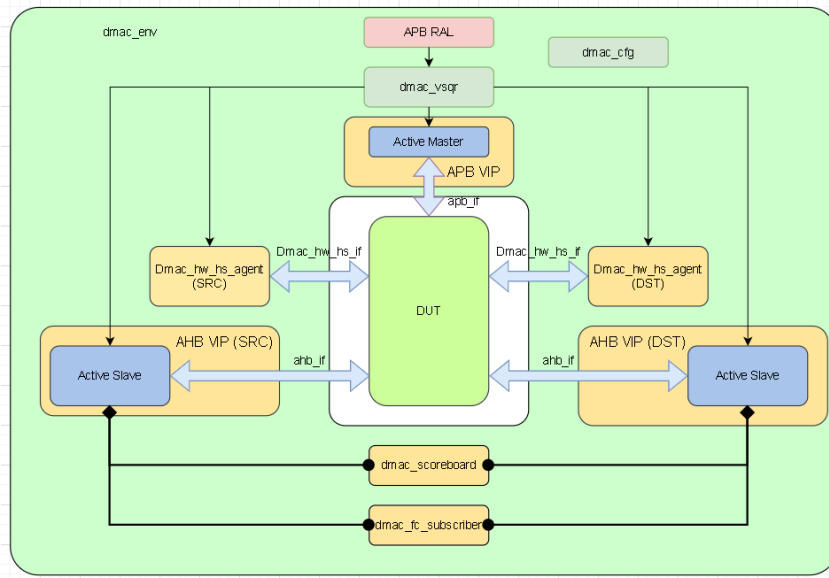


Рис. 2. UVM середовище тестування DMA

інтерфейсів та має опцію HW handshaking що вділяє його з-поміж інших варіантів які є у відкритому доступі.

Для побудови тестового стенду необхідні наступні компоненти:

1. Симулятор, який підтримує мову SystemVerilog версії IEEE-1800-2017.

2. Компілятор який підтримує бібліотеку UVM 1800.2-2020 – IEEE, та з підтримкою рандомізації та оцінкою покриття (coverage).

3. Скрипти для створення команд для компіляції та симуляції середовища.

У даній роботі буде використовуватися Synopsys VCS у якості симулятора, та Synopsys Verdi для перегляду сигналів (waveforms) та результатів покриття, оскільки дані інструменти задовольняють вищеперерахованим вимогам.

Процес створення верифікаційного середовища (рис. 2) включає наступні етапи:

1. Ініціалізація середовища: На даному етапі створюється саме середовище (dmac_env), файл конфігурації (dmac_cfg) та інтегруються VIPs. В даному прикладі використовуються два АНВ Slave VIP від Synopsys для симуляції передачі даних від одного до іншого та один APB Master VIP від Synopsys для конфігурації DMA. Також інтегровано два агенти для HW handshaking.

2. Розробка пошукових алгоритмів (sequence): На даному етапі створюються випадкові та цільові тестові послідовності, які зможуть сконфігурувати DMA контролер певним чином та просимулювати той чи інший випадок.

3. Налаштування модулю сповіщення (scoreboard): Один з найскладніших етапів розробки верифікаційного середовища – це продумування та створення тестових модулів (checkers). В даному середовищі більшість тестових модулів перевіряють коректність роботи DMA, порівнюючи дані, які були записані в регістри DMA контролера під час конфігурації з реальними даними, отриманими з DUT.

4. Запуск тестів: Для запуску пошукових алгоритмів (sequence) створюються тести. Для більшого покриття зазвичай створюють скрипти які регресивно запускають необхідні тести в необхідній кількості.

5. Збір покриття та доповнення тестів: Планування та збір функціонального покриття це найвідповідальніший етап верифікації, оскільки саме на цьому етапі визначається наскільки верифікований дизайн, чи всі його функції перевірені та як саме.

Верифікація DMA-блоку була проведена за допомогою розробленого алгоритму. Функціональне покриття досягло 95%, що свідчить про високу ефективність верифікаційного середовища. Результати функціонального покриття зображено на рисунку 3.

Незважаючи на досягнутий результат, покриття не досягло 100% ймовірно через баги, які ще залишились в дизайні.

Висновки. У результаті проведеного дослідження реалізовано алгоритм верифікації блоку DMA, заснований на рандомізації з обмеженнями. Запропонований метод дозволяє ефективно перевіряти функціональність DMA-блоку,

Avg. Group Score:97.86% U+C:45 U:3 C:42 X:0					
Avg. Group Inst. Score:97.86% U+C:45 U:3 C:42 X:0					
Group	Score	Instances	U+C	U	C
Cg dmac_pkg::dmac_fc_subscriber::dmac_hready_ctrl_cg	100.00%		6	0	
Cr dst_hready_num_wait_cycles	100.00%		3	0	
Cr src_hready_num_wait_cycles	100.00%		3	0	
Cg dmac_pkg::dmac_fc_subscriber::dmac_transaction_cg	95.71%		39	3	
Cr block_ts	57.14%		7	3	
Cr dar	100.00%		5	0	
Cr dst_addr_inc	100.00%		1	0	
Cr dst_tr_width	100.00%		3	0	
Cr fifo_th	100.00%		4	0	
Cr sar	100.00%		5	0	
Cr src_addr_inc	100.00%		1	0	
Cr src_dst_type	100.00%		1	0	
Cr src_tr_width	100.00%		3	0	
Cr mem_per_type_width	100.00%		9	0	

Рис. 3. Результати функціонального покриття

забезпечуючи високе функціональне покриття та виявляючи потенційні помилки в дизайні. Обраний підхід демонструє високу гнучкість та здатність адаптуватися до різних умов тестування, що робить його оптимальним для верифікації DMA-блоків у сучасних цифрових системах.

Для подальшого вдосконалення методики верифікації планується:

1. Збільшення функціонального покриття: Розширення тестових сценаріїв для досягнення 100% покриття.

2. Оптимізація алгоритму рандомізації: Вдосконалення обмежень для більш ефективного генерування тестових послідовностей.

3. Інтеграція додаткових перевірок: Додавання нових тестових модулів для перевірки додаткових аспектів функціонування DMA-блоку.

Таким чином, реалізація запропонованого алгоритму верифікації є важливим кроком у напрямку підвищення надійності та якості цифрових систем, забезпечуючи їхню стабільну та ефективну роботу.

Список літератури:

1. What is functional verification. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.cadence.com/en_US/home/explore/functional-verification.html
2. ASIC verification flow. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vlsiverify.com/asic-flows/asic-verification-flow/>
3. Opencores.org project – DMA AHB – 32 bit build. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://github.com/freecores/dma_ahb/tree/master/src/dma_ahb32

Sarzhynskiy V.A., Lebedev D.Yu., Antonyuk A.I. IMPLEMENTATION OF A CONSTRAINED RANDOM ALGORITHM FOR VERIFICATION OF THE DMA CONTROLLER MODULE SYNTHESISED IN HARDWARE DESCRIPTION LANGUAGES

The article is devoted to the development and implementation of a verification algorithm for the Direct Memory Access (DMA) block, which is a critical component in modern digital systems. The article reveals the importance of verification as one of the key stages in the development of electronic systems to ensure their reliability, compliance with technical requirements and avoidance of errors at the production stage. Particular attention is paid to DMA controllers, which are responsible for transferring data between memory and peripheral devices without the participation of the central processor. Incorrect operation of such components can lead to data loss, performance degradation, and system instability, which necessitates effective verification.

The article defines the purpose of the study – to implement a randomization-based DMA block verification algorithm with constraints to check functionality and compliance with specifications. It has been found that the key stages of the verification process are the creation of a verification plan, development of a test environment, creation of tests, conducting simulations, collecting functional coverage and analyzing the results. The

paper also reveals a methodology for building a verification environment that uses Universal Verification Methodology (UVM) components to ensure maximum flexibility and efficiency of testing.

The main aspects of implementing the verification algorithm, including creating test sequences, integrating verification modules, and analyzing the results of functional coverage, are revealed. The verification was carried out for the AHB DMA Controller module, an open source module that uses AHB-Lite interfaces. As a result, functional coverage of 95% was achieved, which confirms the effectiveness of the proposed algorithm and verification environment.

It is found that one of the reasons for not achieving 100% coverage is possible bugs in the design that require further improvement. The prospects for development are identified, including optimization of the randomization algorithm, expansion of test scenarios to achieve 100% coverage, and integration of new checks for more detailed testing.

The proposed method demonstrates high flexibility, which allows it to be adapted to different testing conditions and applied to verify other components of digital systems. The results of the study can be useful for engineers in the field of hardware development, ensuring the stable operation of modern digital systems.

Key words: *verification, DMA, random constrained verification, functional coverage, test environment.*

Соколов К.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чмельов В.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОВОРОТНОЮ РОБОТИЗОВАНОЮ ВІДЕОКАМЕРОЮ PTZ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОТОКОЛУ ONVIF

У даній статті розглядається питання реалізації програмно-апаратної системи керування виявлення і відстеження малогабаритних літальних безпілотних апаратів за допомогою системи відеокамер. Авторами зазначено контексти постановки завдання з огляду на застосування отриманого рішення у сфері безпеки. Продемонстровано загальну логіку запропонованого комплексу а також наведено структурну схему взаємодії комплексу з зовнішнім керуючим алгоритмом та наявності оператора. Розглянуті типові рішення, які вже існують на ринку та підлягають серійному виробництву, зазначено альтернативи таких рішень та обґрунтована доцільність їх використання. Зазначено переваги модульності таких систем та високу здатність сучасного обладнання до інтеграцій зі сторонніми системами.

У роботі висвітлено два різних підходи до керування поворотною роботизованою PTZ камери. У першому випадку розглянуто створення алгоритмів керування IP PTZ камерою з використанням API ONVIF протоколу. Показано основний механізм взаємодії користувача (клієнта) з роботизованою камерою на протокольному рівні. Описано специфіку формування запитів керування з оглядом на синтаксис і параметри команд. Розглянуто попередні налаштування на IP PTZ камері, що відповідають за користувача ONVIF та аутентифікацію. Детально описано процес налагодження та тестування запитів з використанням утиліти Postman. Продемонстровані результати виконання типових запитів по отриманню інформації з камери а також по передачі їй команд керування. Авторами надано алгоритм переходу від абсолютних до нормованих величин систем координат камери і навпаки.

Також надано демонстраційний результат відпрацювання тестового алгоритму, створеному у середовищі MATLAB, на практиці з одночасним переглядом живої трансляції організованою за допомогою VLC media player.

Другий підхід полягає у проектуванні системи керування поворотними механізмами з використанням крокових двигунів та контролеру STM32. Авторами показано синтез PID-регулятора для виконання поставленої задачі із заданими характеристиками з огляду на зразок. Також наведено аналіз характеристик отриманого PID-регулятора. У висновках зазначені результати дослідження а також окреслені перспективи продовження роботи

Ключові слова: PTZ, поворотна камера, PID-регулятор, керування, ONVIF, алгоритм керування, камера, API, IP, система координат, координати, МБПЛА, повітряний об'єкт.

Постановка проблеми. Малогабаритні безпілотні літальні апарати (МБПЛА) стрімко знаходять застосування у різних сферах використання. Масовість даного явища сприяє заповненню повітряного простору великою кількістю об'єктів. Виникає потреба контролювати повітряний простір для запобігання небажаних ситуацій. Ще одним аспектом необхідності моніторингу повітряного простору є захист приватної власності від несанкціонованого втручання, запобігання іншим видам загроз, які можуть нести МБПЛА – дрони,

оскільки останні можуть оснащуватися додатковим обладнанням, таким як такелажні системи, камери, направлені джерела випромінювання, тощо. Тому безпекова сфера потребує ефективних, мобільних та відносно дешевих засобів моніторингу повітряного простору, які будуть використовуватися для виявлення, супроводження, та за можливості, ідентифікації повітряних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальна інформація про призначення та особливості застосування IP PTZ (Pan-Tilt-Zoom) камер висвіт-

лена у фундаментальних працях [1, 2] та статтях [3, 4]. Повна документація щодо функціонування та побудови протоколу ONVIF (Open Network Video Interface Forum) знаходиться у відкритому доступі на офіційному сайті [5]. Авторами роботи надані варіанти прикладного використання проколу ONVIF у системах відеоспостереження [6]. Моделювання та дослідження систем у середовищі MATLAB подані у роботах [7–9]. Основні теоретичні відомості щодо синтезу PID-регуляторів висвітлені у працях [10–12]. Також у статті використані посилання на готові вироби, що перебувають у серійному виробництві.

Постановка завдання. Метою статті є розробка алгоритмів керування поворотною IP PTZ [1] камерою з використанням протоколу ONVIF, а також обрахунку альтернативної системи керування поворотною платформою з використанням крокових двигунів. Дане завдання постає в рамках виявлення та відслідковування малогабаритних літальних об'єктів за кутовими координатами за допомогою системи відеокамер.

Виклад основного матеріалу. Для виконання поставленого завдання розглянемо наступну систему на рисунку

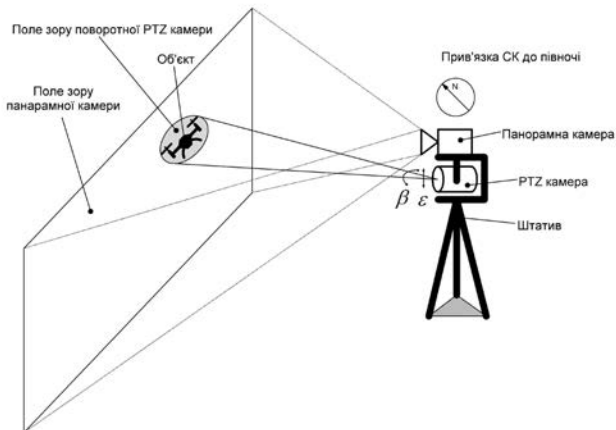


Рис. 1. Запропонована система стеження та визначення координат

Система складається з панорамної камери з малою фокусною відстанню та поворотної роботизованої PTZ камери. Зазначимо також що на рисунку не зазначено пункт керування, який

в найпростішому випадку являє собою електронно-обчислювальну машину з встановленим спеціалізованим ПЗ (програмним забезпеченням), що може додатково використовуватися як автоматизоване робоче місце оператора. Уточнимо, що системи координат камер є узгодженими між собою і приведені до загальної абсолютної, оптичної осі в нульовому положенні співнаправлені. Допускається виконання панорами за рахунок суміщення камер з фіксованою фокусною відстанню з подальшим зшиванням зображення. В такому випадку необхідно проводити додаткові по обробці зображення, усунення дисторсії та т.ін., в даному дослідженні ці питання не висвітлюються. На противагу існуючим рішенням на ринку IP PTZ [2] камер (рис. 2) є можливість створення власних модульних збірок за рахунок високої потенційної здатності сучасних IP камер відеоспостереження до інтеграції у сторонні системи. Це дозволяє створювати більш вузькоспеціалізовані під технічне завдання комплекси, які можна дооснащувати за потреби додатковими модулями, як наприклад далекомірами.



Рис. 2. Сучасні IP PTZ відеокамери з вбудованим панорамним модулем

Розглядувана система (рис. 3) має виконувати наступні дії. Алгоритм видачі координат, який працює з панорамною камерою видає кутові координати до спеціалізованого ПЗ. Останнє виконує нормування координат до формату закладеного ПЗ самої PTZ камери, формує та надсилає запит на серверну частину IP PTZ камери. Камера виконує поворот за заданим напрямком. Оператор спостерігає об'єкт та може скоректувати кутові координати PTZ камери на об'єкт за рахунок візуального відстеження зображення і повернути їх на рівень вище.



Рис. 3. Блок-схема роботи комплексу моніторингу

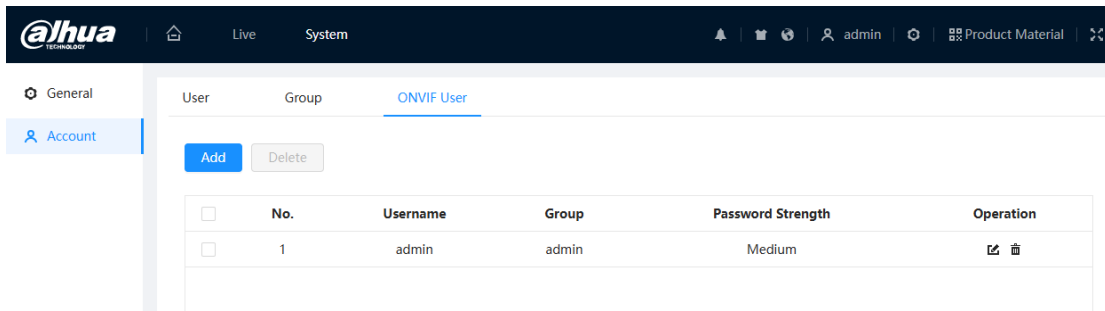


Рис. 4. Інформація щодо існуючого користувача ONVIF

Для керування камерою PTZ камерою за протоколом ONVIF перш за все потрібно провести попереднє налаштування самої камери. Камера має бути активована, їй має бути присвоєна власна IP адреса, створений користувач ONVIF з адміністративними правами (рис. 4) та має бути налаштований тип аутентифікації для отримання доступу до керування камерою (рис. 5). Попередні налаштування проводяться на веб-інтерфейсі камери з клієнта який підключений до камери у локальній IP мережі.

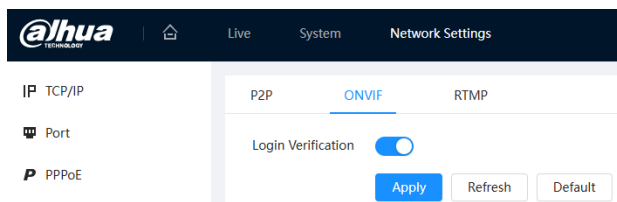


Рис. 5. Налаштування типу аутентифікації ONVIF

Документація протоколу ONVIF та API знаходяться у вільному доступі в різних форматах, що дозволяє ефективно їх використовувати. API (Application Programming Interface) ONVIF працює з використанням HTTP (HyperText Transfer Protocol) запитів у форматі SOAP (Simple Object Access Protocol) з синтаксисом XML та використанням WSDL (Web Services Description Language) для опису операцій. Власне взаємодія клієнта з камерою показана на рисунку 6.

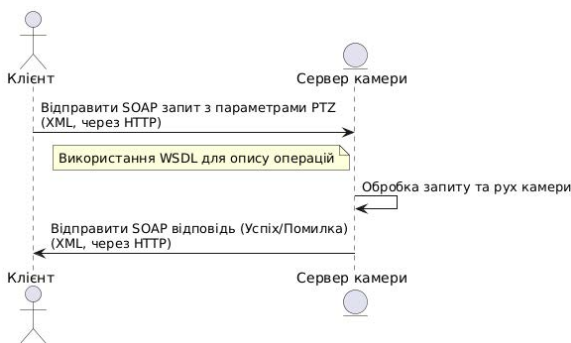


Рис. 6. Процес взаємодії з API

WSDL – це мова описання веб-сервісів [13]. На рисунку 7 наведено частину опису WSDL файлу, який показує які операції доступні на сервері (в нашому випадку PTZ камери) та які параметри необхідно передавати для виконання команд передбачених у WSDL файлі, а також зазначено які параметри та дані повертає сервер камери після виконання певної операції.

Попереднє тестування взаємодії з API ONVIF задля керування поворотом камери проводилось у ПЗ Postman [14]. Дане програмне забезпечення призначене для тестування та налагодження роботи різноманітних API. Postman надає можливість формувати та надсилати запити на сервер для виконання певних команд, а також отримувати відповіді від сервера.

Процес налагодження починається з проходження аутентифікації на сервері нашої PTZ камери для отримання доступу на її керування (рис. 8). Тип аутентифікації Digest вхід за логіном та паролем які зазначені на камері у розділі користувач ONVIF, IP адреса – локальна адреса камери призначена користувачем.

Надалі формуються тестові запити (рис 9, 10) на основі документації ONVIF [5] та виконується перевірка опрацювання запитів сервером. На рисунку можна побачити сам запит, а також дані, які повертаються з серверу PTZ камери після його виконання. Серед повернутих даних можна побачити модель камери, її серійний номер, версію програмного забезпечення.

На рисунках 9 та 10 продемонстровано склад запиту який необхідно надіслати камери для виконання певних функцій. В даному випадку це функція отримати інформацію про пристрій, завдяки якій ми можемо дізнатися модель пристрою, його серійний номер, версію прошивки, а також наведено команду для виставлення камери у певну позицію за координатами. Як можна помітити, координати передаються у нормованих величинах. Отже наступним етапом

ONVIF® <http://www.onvif.org/ver20/ptz/wsd/2.2>

Operations

Port type PTZ

1. AbsoluteMove

Description:
 Operation to move pan,tilt or zoom to a absolute destination.
 The speed argument is optional. If an x/y speed value is given it is up to the device to either use the x value as absolute resolving speed vector or to map x and y to the component speed. If the speed argument is omitted, the default speed set by the PTZConfiguration will be used.

SOAP action:
<http://www.onvif.org/ver20/ptz/wsd/AbsoluteMove>

Input:

```
[AbsoluteMove]
  • ProfileToken [ReferenceToken]
    A reference to the MediaProfile.
  • Position [PTZVector]
    A Position vector specifying the absolute target position.
  • Speed - optional; [PTZSpeed]
    An optional Speed.
    • PanTilt - optional; [Vector2D]
      Pan and tilt speed. The x component corresponds to pan and the y component to tilt. If omitted in a request, the current (if any) PanTilt movement should not be affected.
    • Zoom - optional; [Vector1D]
      A zoom speed. If omitted in a request, the current (if any) Zoom movement should not be affected.
```

Output:

```
[AbsoluteMoveResponse]
```

Рис. 7. WSDL файл

POST ▼ <http://192.168.110.87/onvif/PTZ> Send ▼

Params **Authorization** Headers (8) Body ● Scripts Settings Cookies

Auth Type
 Digest Auth ▼

The authorization header will be automatically generated when you send the request. Learn more about [Digest Auth](#) authorization.

By default, Postman will extract values from the received response, add it to the request, and retry it. Do you want to disable this?

Yes, disable retrying the request

Username: admin

Password: qwer0987 ⚠

> Advanced configuration

ⓘ Heads up! These parameters hold sensitive data. To keep this data secure while working in a collaborative environment, we recommend using variables. Learn more about [variables](#). ✕

Рис. 8. Налаштування Postman

буде пов'язання нормованих величин камери з абсолютними величинами у загальній системі координат. Для того щоб перейти до більш зрозумілої сферичної системи координат (СК) застосуємо вирази (2). Залежності при перерахунку координат лінійні, отже маємо можливість транслювати координати з однієї СК у іншу та навпаки. Додатково аналогічним чином обраховується коефіцієнт наближення (Zoom)

$$R = R_{\min} + \frac{(N - N_{\min})}{(N_{\max} - N_{\min})} \cdot (R_{\max} - R_{\min}) \quad (1)$$

$$N = N_{\min} + \frac{(R - R_{\min})}{(R_{\max} - R_{\min})} \cdot (N_{\max} - N_{\min})$$

де: R – поточне значення у сферичній СК, N – поточне значення у нормованій СК, $R_{\max}, R_{\min}, N_{\max}, N_{\min}$ – граничні значення повороту та нахилу камери у сферичній та нормованій СК відповідно.

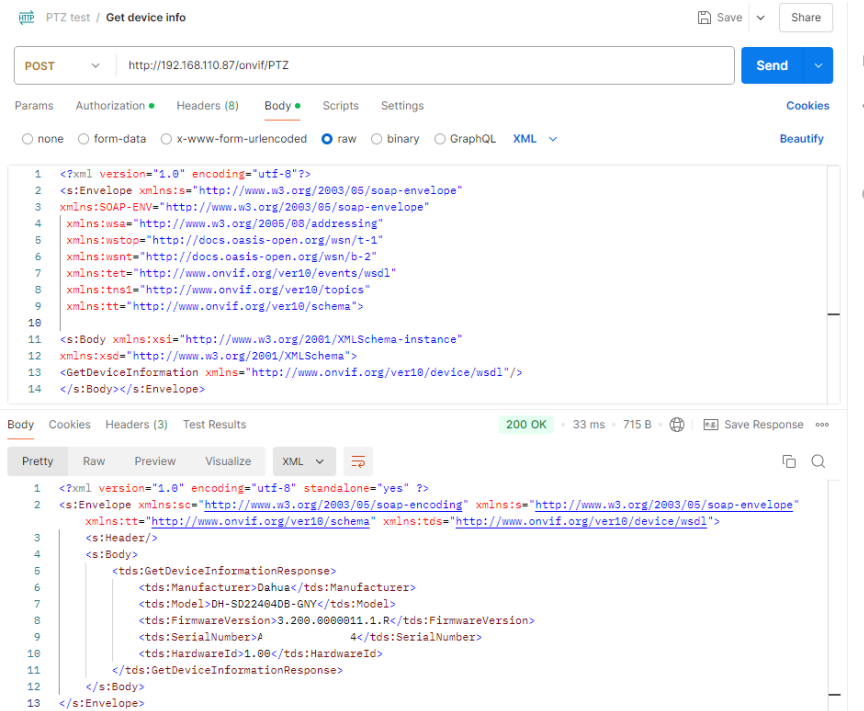


Рис. 9. Запит GetDeviceInformation

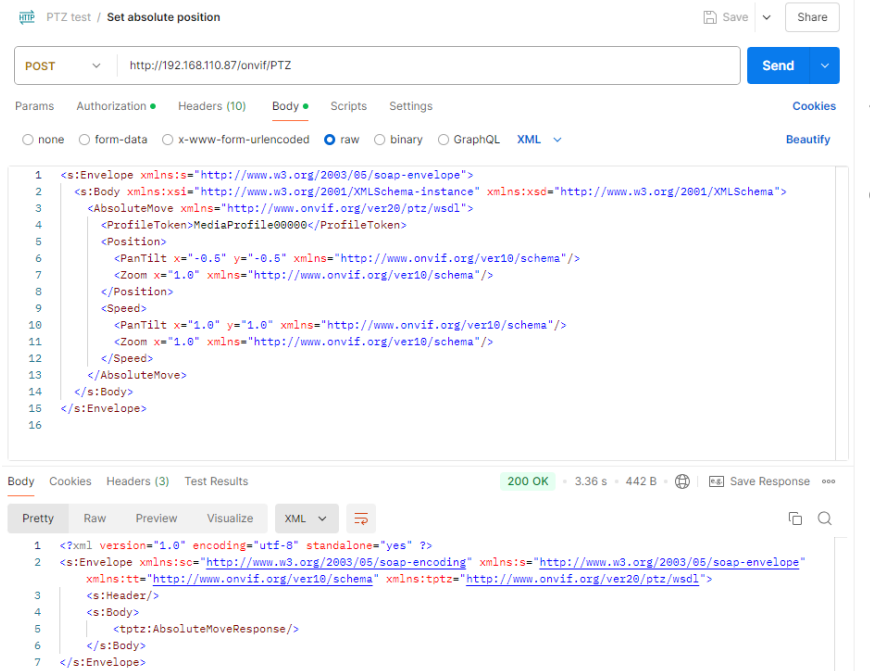


Рис. 10. Запит AbsoluteMove

У таблиці 1 наведено дані для розрахунку переходів між СК взяті з документації ONVIF [5] та DH-SD22404DB-GNY [15], яка використовувалась у дослідженні. Значення Pan та Tilt наведені в градусах, Zoom в разях. Мінімальні та максимальні значення вказані з врахуванням віддзеркалення сцени на по вертикалі.

Таблиця 1

Змінна	R		N	
	min	max	min	max
Pan	0	355	1	-1
Tilt	0	90	1	-1
Zoom	1	4	0.25	1

На рисунку 11 наведено частину програмного коду модуля керування PTZ камерою, що містить рядки генерації SOAP запиту у рамках взаємодії з API ONVIF у виконанні GUI інтерфейсу у середовищі MATLAB для зручності оператора.

Для перевірки роботи алгоритму спрямування поворотної роботизованої камери за заданими координати створимо невеликий алгоритм випадкової видачі координат. Алгоритм генерує координати виходячи з обмеженнями поворотної камери які, власне, зазначені у документації камери в розділі PTZ (Pan, Tilt, Zoom). Та були наведені вище у таблиці 1.

На рисунку можна побачити результат відпрацювання тестового алгоритму, створеному у середовищі MATLAB [7], на практиці з одночасним переглядом живої трансляції організованою за допомогою VLC media player (рис. 12). Дане ПЗ [16] є безкоштовним мультимедійним плеєром з відкритим вихідним кодом, який здатен відтворювати мультимедійні файли різних форматів а також різноманітні потокові протоколи. В нашому випадку використовується поточковий протокол передачі відео RTSP (Real Time Streaming Protocol) [17]. Даний протокол є універсальним протоколом передачі відео у сучасних

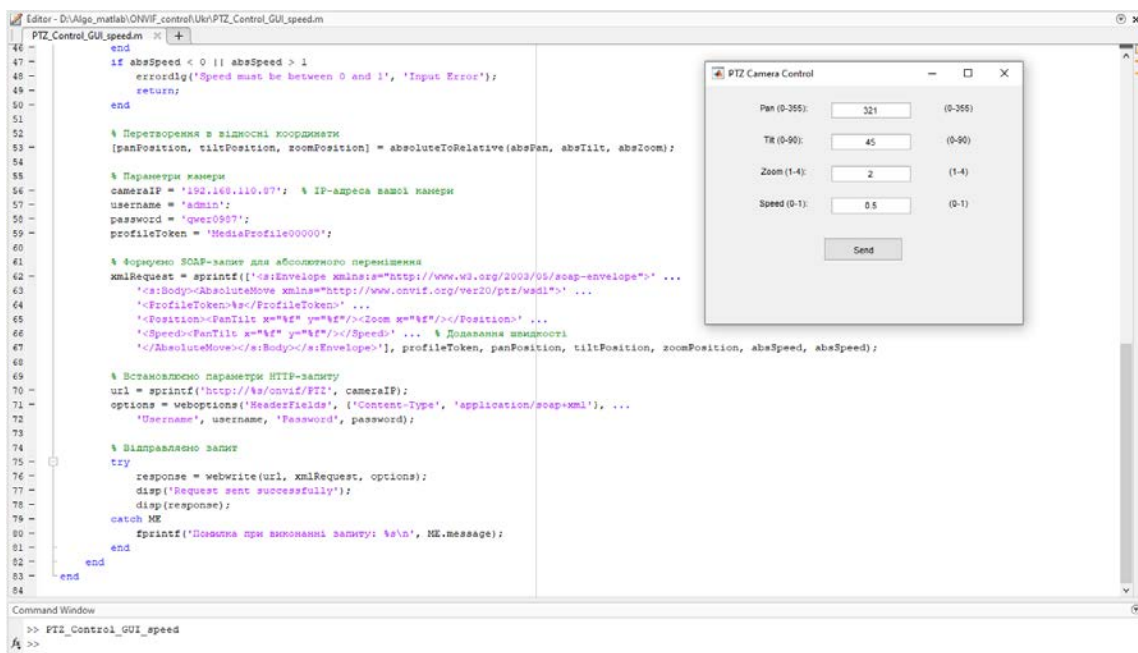


Рис. 11. GUI інтерфейс керування камерою

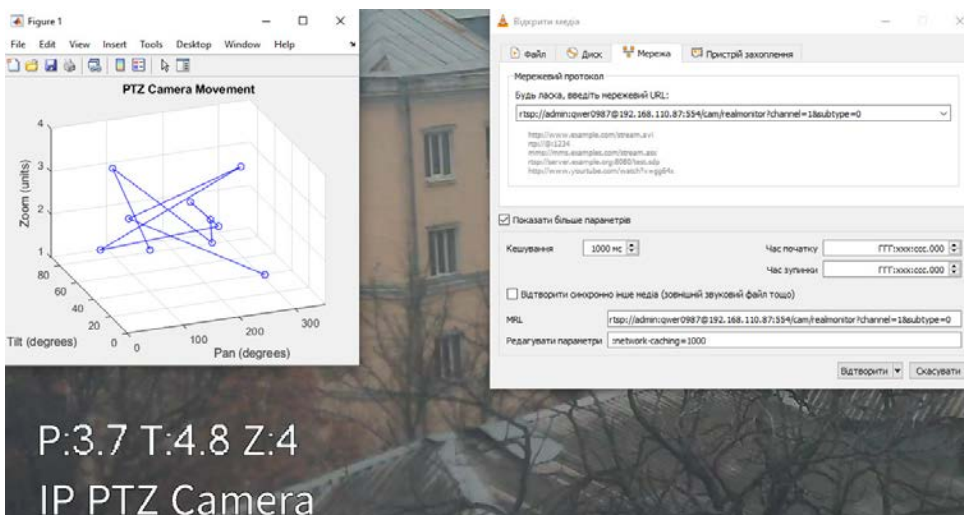


Рис. 12. Демонстрація роботи PTZ камери

системах відеоспостереження і використовується для інтеграції у сторонні системи.

Інший варіант реалізації системи керування – створення власної поворотної платформи, що керується кроковими двигунами. Опираючись на готові зразки розглянемо будову типової PTZ камери (рис. 13).

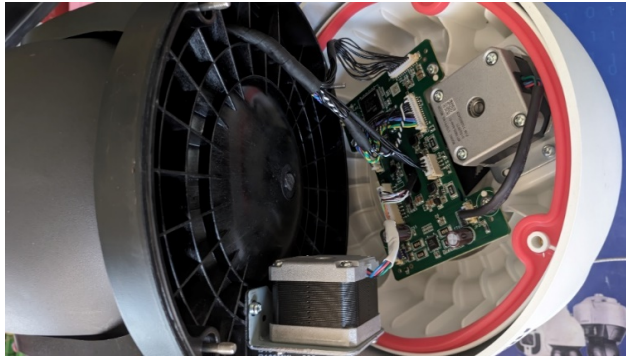


Рис. 13. Будова типової PTZ камери

У розібраній камері можна побачити крокові двигуни [18], характеристики яких наведені на рисунку 14.

Детальніше зупинимося на кроковому двигуні та опишемо процес взаємодії з ним. Система позиціонування PTZ камери використовує по одному двигуні в кожній площині та скеровує оптичну вісь за азимутом та кутом місця відповідно. Надалі опишемо систему керування поворотом за каналом керування азимутальним кутом. За кутом місця роз'яснення буду такі ж самі за винятком кутових обмежень поворотного механізму обумовлених конструктивною будовою PTZ камери.

Зауважимо, що існують стандартні та прецизійні крокові двигуни. З розглянутих нами перші мають крок 1,8 градуса [18], другі – 0,9 градуса. Проте у поєднанні з редукторами можна досягнути і більш високої точності.

За зразок для визначення динамічних характеристик поворотної платформи візьмемо камеру DH-SDT4E425-4F-GB-A-PV1 [19]. На рисунку 15 наведено паспортні дані PTZ камери Dahua типу X-Spans TiOC. В рамках дослідження нас цікавлять параметри описані у пункті PTZ, які відповідають за можливість камери до повороту а також швидкості її реагування на сигнали керування.

Для керування кроковим двигуном будемо використовувати PID-регулятор [11]. Даний регулятор є одночасно простим та універсальним і підходить для виконання задачі керування кроковим двигуном. Класичний PID-регулятор містить пропорційний компонент, інтегральний компонент та диференціальний компонент, які мають свої переваги та недоліки. Об'єднання цих компонентів дозволяє нівелювати недоліки і поєднати переваги [10]. Математична модель роботи PID-регулятора, який формує керуючу дію на основі поточної помилки

$$u(t) = Ke(t) + K_I \int_0^t e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

де $u(t)$ – керуюча дія, $e(t)$ – помилка, K – коефіцієнт підсилення пропорційної складової, K_I – коефіцієнт підсилення інтегральної складової, K_D – коефіцієнт підсилення диференціальної складової.

Синтез PID-регулятора проводився в середовищі Simulink. PID регулятор був розрахований за виразом 3 у S-площині (з перетворенням Лапласа)

$$C(s) = P + I \cdot \frac{1}{s} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot \frac{1}{s}} \quad (3)$$

Об'єкт який піддається регуляції в нашому випадку складається з крокового двигуна, редуктора та корпуса камери, що представляють собою відповідно інтегральну ланку, ланку підсилення та аперіодичну ланку першого порядку [12].

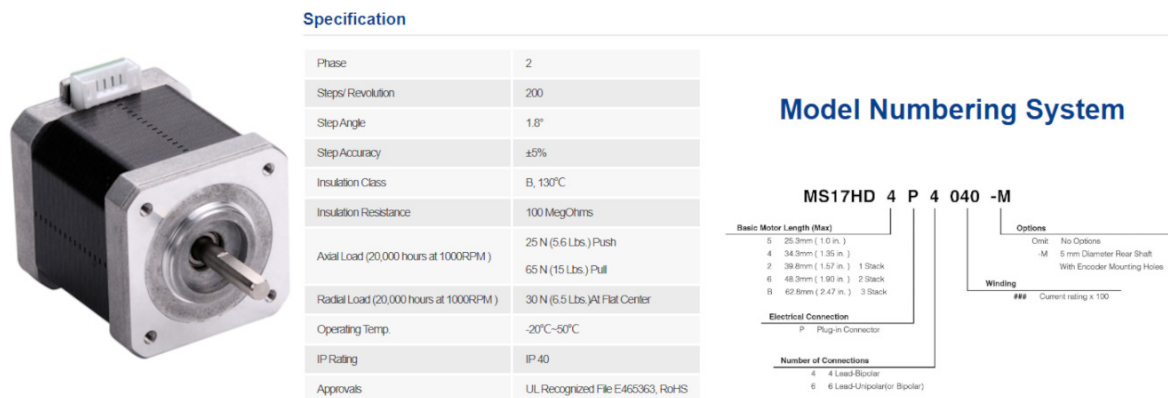


Рис. 14. Характеристики крокового двигуна



Lens				
Focal Length	Panorama: 2.8 mm; Detail: 5 mm–125 mm			
Max. Aperture	Panorama: F1.0; Detail: F1.6–F3.6			
Field of View	Panorama: H: 101°; V: 53°; D: 120°; Detail: H: 51.9°–3.0°; V: 39.7°–2.2°; D: 63.1°–3.7°			
Optical Zoom	Panorama: NA; Detail: 25x			
Focus Control	Auto; semi-auto; manual			
Close Focus Distance	Panorama: 0.2 m (0.66 ft); Detail: 0.1 m–0.5 m (0.33 ft–1.64 ft)			
Iris Control	Auto; manual			
DORI Distance	Detect	Observe	Recognize	Identify
	2500 m (8202.10 ft)	987.5 m (3239.83 ft)	500 m (1640.42 ft)	250 m (820.21 ft)
	PTZ			
	Pan/Tilt Range			
Manual Control Speed		Preset Speed		
Pan: 0.1°/s–200°/s; Tilt: 0.1°/s–120°/s		Pan: 240°/s; Tilt: 200°/s		

Рис. 15. Камера DH-SDT4E425-4F-GB-A-PV1 та її характеристики

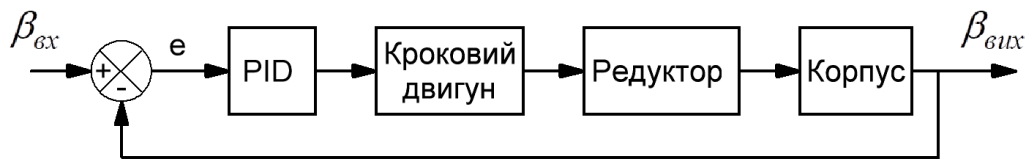


Рис. 16. Загальна модель керування

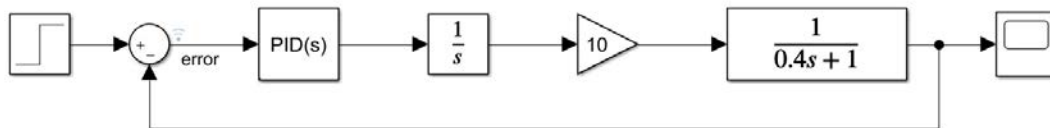


Рис. 17. Фактична модель керування

Коливальною ланкою можна знехтувати, оскільки вважаємо, що корпус має низьку інерційність. Загальна модель представлена на рис. 16.

На рисунку 17 наведено фактичну модель зібрану в середовищі Simulink над якою проводилося дослідження.

Синтез оптимального PID-регулятора проводився в системі MATLAB методом підбору коефіцієнтів, що дало змогу забезпечити необхідні параметри його роботи. Час встановлення стаціонарного режиму за вимогами задамо до 200 мс.

Формула 4 показує передавальну характеристику PID контролера розрахованого із зазначеними вище параметрами

$$C(s) = \frac{5221s^2 + 1.15 \cdot 10^4 s + 2942}{s^2 + 3860s} \quad (4)$$

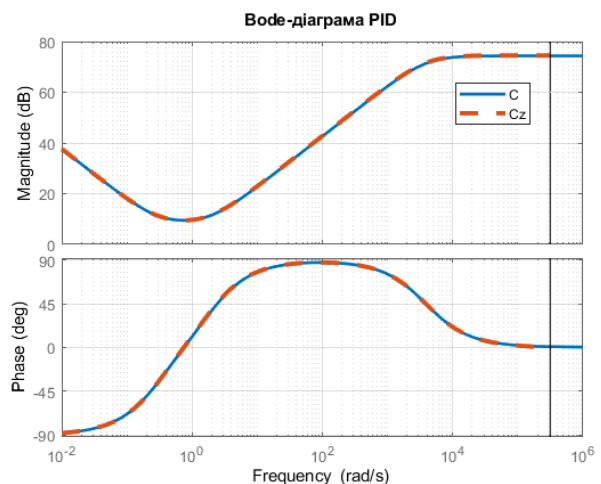
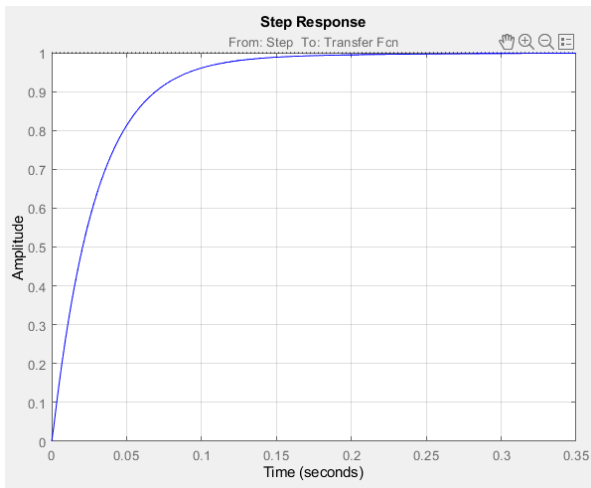
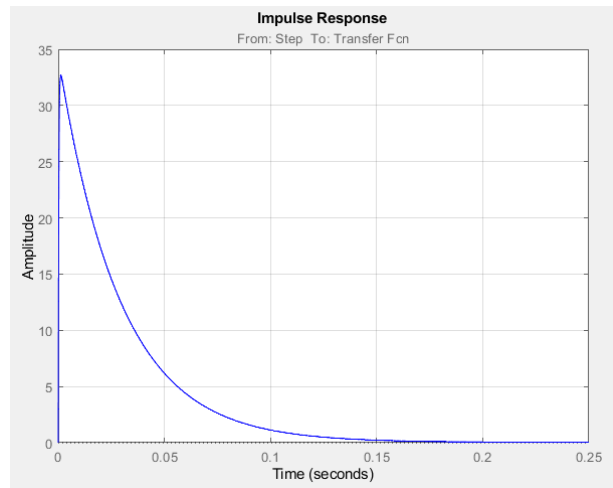


Рис. 18. ЛАЧХ та ФЧХ PID-регулятора

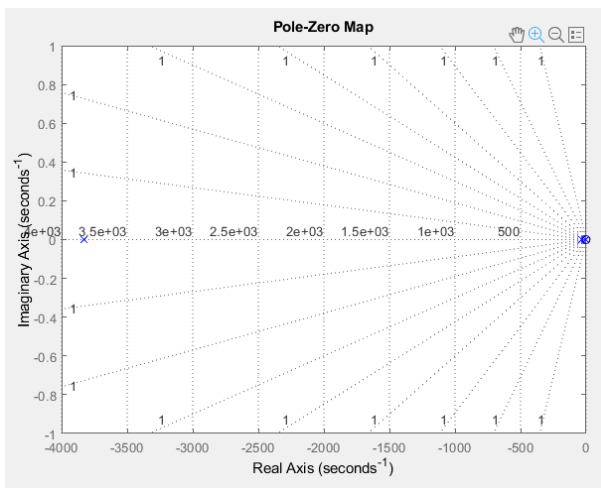


а)

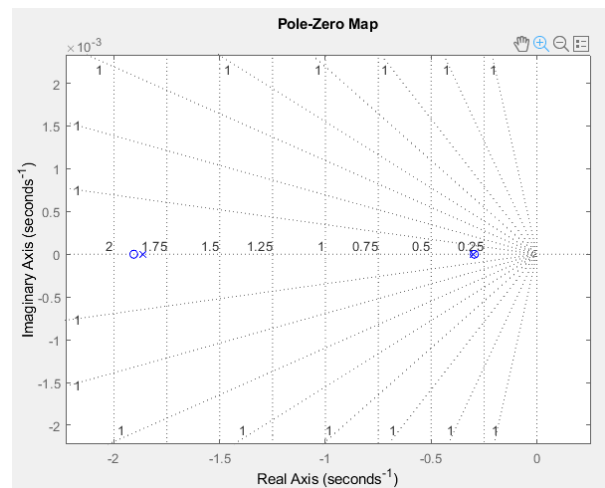


б)

Рис. 19. Перехідна (а) та імпульсна (б) характеристики моделі



а)



б)

Рис. 20. Карта нулів та полюсів

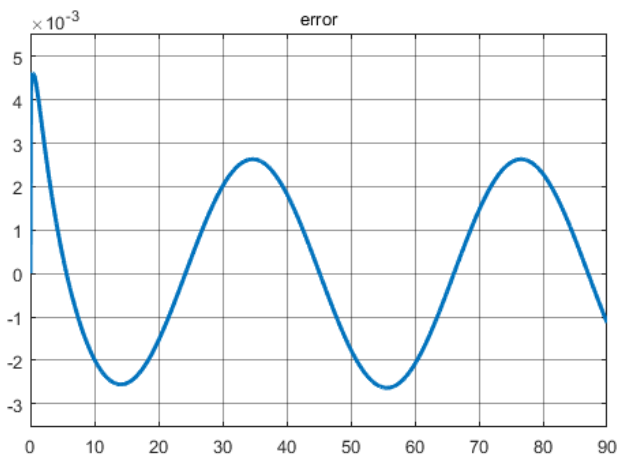


Рис. 21. Графік помилки при відпрацюванні

Формула 5 визначає передавальну характеристику після дискретизації з частотою 100 кГц

$$C(z) = \frac{5221z^2 - 1.044 \cdot 10^4 z + 5221}{z^2 - 1.962z + 0.9621} \quad (5)$$

Про якість та точність дискретизації нашої функції PID-регулятора свідчить повна сходимость вищевказаних виразів на логарифмічній амплітудно-частотній та фазо-частотній характеристиках.

На рисунку 19 наведено перехідну та імпульсну характеристики досліджуваної моделі. Як бачимо, на рисунку 19 а) перехідний процес триває до 0.2 секунди, що задовольняє вимогам які ми окреслили раніше.



- Reset and power management
 - Digital & I/Os supply: $V_{DD} = 2.4\text{ V to }3.6\text{ V}$
 - Analog supply: $V_{DDA} = V_{DD}$ to 3.6 V
 - Power-on/Power down reset (POR/PDR)
 - Low power modes: Sleep, Stop, Standby
- Clock management
 - 4 to 32 MHz crystal oscillator
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
 - Internal 8 MHz RC with x6 PLL option
 - Internal 40 kHz RC oscillator

Рис. 22. Плата контролера STM32F030 та його характеристики

На рисунку 20 наведено карту нулів та полюсів нашої моделі. Всі полюси знаходяться в лівій напівплощині, що свідчить про стійкість даної системи.

На рисунку 21 зображено графік який демонструє похибку системи при виконанні керуючому впливі. Дана похибка не перевищує ± 0.003 від максимального амплітудного значення в стаціонарному режимі, що становить 0.3 %, якщо на вході системи подається еталонна синусоїда однічної амплітуди, яка моделює плавні повороти PTZ камери.

Для реалізації такої системи можна обрати, у якості контролера керування, контролер STM32F030 [20] який є широко розповсюдженим, відносно дешевим та має всі необхідні показники, які задовольняють нашим вимогам. Також, варто зазначити, що контролер має можливість підключення периферії для того щоб керувати сигналами. Даний контролер здатний забезпечити 100 кГц частоту дискретизації, саме цю частоту ми вказували при дискретизації виразу нашого PID-регулятора. Детальні налаштування та програмування контролера розглядати не будемо оскільки це виходить за рамки дослідження. На рисунку 22 показана плата контролера STM32, також зазначені деякі його часткові характеристики, взяті з паспортних даних.

Висновки. В рамках даного дослідження розроблено алгоритм керування поворотною роботизованою камерою з використанням відкритого протоколу ONVIF. Дана система дозволяє спрямовувати камеру за потрібним напрямком, який може бути виданий будь-яким зовнішнім алгоритмом керування. Розглянута конфігурація, що складається з двох сумішених камер

(PTZ та панорамної оглядової камери) передбачає комплексну роботу. Алгоритм визначення об'єкту у повітряному просторі обробляє відеопотік з панорамної камери, за потреби передаючи вказівки на рухому поворотну камеру, що дозволяє більш детально побачити об'єкт, та за наявності оператора системи підкоригувати більш точно PTZ камеру (детальний вид). Таким чином уточнивши положення об'єкту та передавши команду керування зворотного зв'язку. Така комбінація не тільки дає змогу стежити за об'єктом, а більш точно ідентифікувати його. Альтернативою керування IP PTZ камерою може бути проектування власної поворотної платформи на обраній, відповідно до заданих умов технічного завдання елементній базі. Це спрощує систему і зменшує її собівартість, оскільки велика частина функціоналу IP PTZ камери не використовується. Проте це вимагає додаткової розробки, розрахунків, написання алгоритмів по проектуванню готового пристрою.

Дообладнання такої системи можливо іншими пристроями, що надасть додаткову інформацію про об'єкт. У простій реалізації це може бути лазерний далекомір або FMCW-радар у виконанні готових продуктів чи відповідних модулів. Що дозволить, в одному випадку додатково виміряти відстань до об'єкта в результаті точного визначення його кутового положення, а в іншому випадку також отримати дані про швидкість руху об'єкту. Більш складна та високовартісна система може включати додаткові давачі різної фізичної природи, як наприклад тепловізор. Проте, це збільшує на порядки вартість системи і виходить за рамки поставленого завдання, а лише демонструє можливі модифікації.

Список літератури:

1. Kolekar M. H. Intelligent Video Surveillance Systems: An Algorithmic Approach. Taylor & Francis Group, 2018. 180 p.
2. Nilsson F., Nilsson F., Axis C. Intelligent Network Video. New York : Routledge, 2017. : CRC Press, 2016. URL: <https://doi.org/10.1201/9781315399904> (date of access: 26.11.2024).
3. Lee S.-G., Batkhisig R. Implementation of a Real-Time Image Object Tracking System for PTZ Cameras. Convergence and Hybrid Information Technology. Berlin, Heidelberg, 2011. P. 121–128. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-24106-2_16.
4. Real-time video tracking using PTZ cameras / S. Kang et al. Quality Control by Artificial Vision, Gatlinburg, United States / ed. by K. W. Tobin, Jr., F. Meriaudeau. 2003. URL: <https://doi.org/10.1117/12.514945>.
5. December 2023 - ONVIF. ONVIF. URL: <https://www.onvif.org/profiles/specifications/specification-history/december-2023>.
6. Di H. W., Luo C. Y., Cai X. C. Research and Application of ONVIF Protocol in IP Camera. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 568-570. P. 1399–1402. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.568-570.1399>.
7. Attaway S. Matlab: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. Elsevier Science & Technology, 2022.
8. Davis T. A. MATLAB Primer. Taylor & Francis Group, 2010. 248 p.
9. Moore H. MATLAB for Engineers. Pearson Education, Limited, 2009. 624 p.
10. Advances in PID Control / T. K. Kiong et al. London : Springer London, 1999. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0861-0>.
11. Pid Control Of Dynamic Systems. Tapir Forlag, 2004. 272 p.
12. Candelino N. W., Jalili N. Dynamic Systems and Control Engineering. Cambridge University Press, 2023.
13. Werner C., Buschmann C., Fischer S. WSDL-Driven SOAP Compression. International Journal of Web Services Research. 2005. Vol. 2, no. 1. P. 18–35. URL: <https://doi.org/10.4018/jwsr.2005010102>.
14. Postman: The World's Leading API Platform | Sign Up for Free. Postman API Platform. URL: <https://www.postman.com/>.
15. SD22204DB-GNY - Dahua International. Dahua Technology. URL: <https://www.dahuasecurity.com/products/All-Products/PTZ-Cameras/WizSense-Series/SD2/SD22204DB-GNY>.
16. VLC: Official site - Free multimedia solutions for all OS! - VideoLAN. - VideoLAN. URL: <https://www.videolan.org/>.
17. RFC 2326: Real Time Streaming Protocol (RTSP). IETF Datatracker. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2326>.
18. NEMA 17 Standard Hybrid Stepper Motors. MOONS. URL: <https://www.moonsindustries.com/series/nema-17-standard-hybrid-stepper-motors-b020105>.
19. SDT4E425-4F-GB-A-PV1 - Dahua International. Dahua Technology. URL: <https://www.dahuasecurity.com/products/All-Products/PTZ-Cameras/X-Spans-Series/SDT4E425-4F-GB-A-PV1>.
20. STM32F0Series - STMicroelectronics. STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f0-series.html>.

Sokolov K.A., Chmelov V.O. SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF A MOTION CONTROL SYSTEM FOR A PTZ ROBOTIC VIDEO CAMERA USING THE ONVIF PROTOCOL

This paper addresses the implementation of a software and hardware system for detecting and tracking small unmanned aerial vehicles (UAVs) using a video camera system. The authors outline the task's context, emphasizing the application of the proposed solution in the field of security. The overall logic of the proposed system is demonstrated, along with a structural diagram illustrating its interaction with an external control algorithm and, if present, an operator. Existing solutions available on the market and suitable for mass production are reviewed, alternatives to these solutions are highlighted, and the feasibility of their use is justified. The advantages of the modularity of such systems and the high integration capabilities of modern equipment with third-party systems are noted.

The paper explores two distinct approaches to controlling a robotic PTZ camera. The first approach involves developing control algorithms for an IP PTZ camera using the ONVIF protocol API. The primary mechanism of user (client) interaction with the robotic camera at the protocol level is demonstrated. The specifics of forming control requests, considering the syntax and parameters of the commands, are described. Preliminary configurations on the IP PTZ camera responsible for ONVIF user settings and authentication are reviewed. The process of debugging and testing requests using the Postman utility is detailed. Results of typical requests for retrieving information from the camera and sending control commands are presented. The authors provide an algorithm for transitioning between absolute and normalized values of the camera's coordinate system and vice versa.

Additionally, a demonstration of the test algorithm developed in the MATLAB environment is provided, showcasing its practical application while simultaneously viewing a live stream organized using VLC media player.

The second approach involves designing a control system for the rotational mechanisms using stepper motors and an STM32 controller. The synthesis of a PID controller to meet the specified task requirements with given characteristics is shown, considering a reference sample. The characteristics of the resulting PID controller are analyzed. The conclusions summarize the research results and outline the prospects for further work.

Key words: PTZ, pan-tilt camera, PID controller, control, ONVIF, control algorithm, camera, API, IP, coordinate system, coordinates, small UAV, aerial object.

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.995 : 662.997

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/26>

Беляновська О.А.

Український державний університет науки і технологій

Сухий К.М.

Український державний університет науки і технологій

Сергієнко Я.О.

Український державний університет науки і технологій

Єрьомін О.О.

Український державний університет науки і технологій

Прокопенко О.М.

Український державний університет науки і технологій

Фролова Л.А.

Український державний університет науки і технологій

ПРОЦЕСИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АДСОРБЦІЙНОГО КОНДИЦІОНЕРА НА ОСНОВІ КОМПЗИТНИХ АДСОРБЕНТІВ «СИЛКАГЕЛЬ – НАТРІЙ СУЛЬФАТ» ТА «СИЛКАГЕЛЬ – НАТРІЙ АЦЕТАТ»

Стаття присвячена дослідженню процесу експлуатації адсорбційного геліокондиціонера на основі композитних адсорбентів «силкагель – натрій сульфат» та «силкагель – натрій ацетат». В статті розкрито основні фактори, які впливають на холодильний коефіцієнт циклу. Підтверджено кореляцію між складом адсорбенту та холодильним коефіцієнтом циклу. Показано зростання холодильного коефіцієнту циклу при підвищенні вмісту натрій сульфату або натрій ацетату в композитному адсорбенті. Підтверджено кореляцію режиму процесу регенерації композита та холодильним коефіцієнтом установки. Встановлено зростання величини холодильного коефіцієнту при зменшенні різниці температур адсорбенту та температури регенерації ΔT_1 . Проаналізовано вплив складу композиту на холодильний коефіцієнт циклу. Показана кореляція режиму процесу регенерації композита та холодильного коефіцієнта установки. Встановлено, що максимальні значення холодильного коефіцієнта відповідають різниці температур адсорбенту та температури регенерації не більше за 55°C для композитів, які містять близько, мас. %: силкагель – 20 та сіль – 80, що відповідає мінімальним розмірам адсорбера. Оцінено експлуатаційний холодильний коефіцієнт адсорбційного кондиціонера на основі композитного сорбенту «силкагель – натрій сульфат» протягом сезону (травень – вересень). Встановлена його залежність від середньодобового значення величини сонячного випромінювання. Порівняні експлуатаційні характеристики адсорбційних геліокондиціонерів на основі композитів «силкагель – натрій сульфат» та «силкагель – натрій ацетат». Показано, що маса композита «силкагель – натрій сульфат» більша ніж в 2 рази менше в порівнянні з композитом «силкагель – натрій ацетат» завдяки більш високій граничній адсорбції, а площа сонячного колектора приблизно на 1 м^2 більше при використанні адсорбенту «силкагель – натрій сульфат». Встановлено, що експлуатаційний холодильний коефіцієнт адсорбційного кондиціонера при використанні композиту «силкагель – CH_3COONa » на 1 % в порівнянні з пристроєм на основі «силкагель – Na_2SO_4 ». Підтверджено перспективність використання композитів «силкагель – натрій ацетат» та «силкагель – натрій сульфат».

Ключеві слова: адсорбційний кондиціонер, композитний адсорбент, гранична адсорбція, хладагент, енергоефективність.

Постановка проблеми. Більша частина енергоспоживання житлових та офісних будівель в літній період припадає на парові компресорні установки для кондиціонування повітря, які є вирішальними для підтримання теплового режиму в приміщеннях, а також комфорту та житлових умов мешканців [1, с. 101275]. Враховуючи динаміку глобального потепління прогнозують, що світове енергоспоживання паровими компресорними кондиціонерами зросте майже в 33 рази до 2100 р. [2, с. 1–15]. Холодильні агенти (фтор-хлор-похідні вуглеводнів), які використовуються в цих установках, мають високий потенціал глобального потепління [3, с. 139315]. До того ж, об'єднання процесів охолодження та осушення повітря призводить до значних втрат енергії та значних викидів діоксида вуглецю. Це спонукає до пошуку альтернативних, екологічно більш безпечних, технічних рішень. Перспективним варіантом в цих умовах стають адсорбційні установки [1, с. 101275]. До їх переваг слід віднести стійкість до вібрацій, практичну відсутність рухомих частин, а також невелику вартість та простоту експлуатації системи. До обмежень цих пристроїв можна віднести великі габаритні розміри та низьку холодопродуктивність. Важливими факторами, які визначають продуктивність даних установок, характеристики адсорбента та робочої рідини – адсорбата.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Адсорбційні установки для охолодження включають холодильну камеру, випарник, за допомогою якого відводиться теплота від охолоджуваного середовища, конденсатор, адсорбер, заповнений адсорбентом, поглинає робочу речовину (холодоагент, тобто адсорбат), а також пристрій для підведення теплоти при регенерації адсорбента, наприклад, сонячний колектор [4, с. 165–171]. Експлуатація пристрою передбачає два етапи: отримання холоду та регенерація адсорбенту.

В якості робочих рідин в адсорбційних кондиціонерах використовують воду або метанол [5, с. 85–95]. Як адсорбенти використовують силікагелі, цеоліти та активоване вугілля [5, с. 85–95]. В той же час, недоліком подібних адсорбентів є низька адсорбційна ємність. Наприклад, 0,3 кг води на 1 кг цеоліта [6, с. 253–276]. Як більш перспективний варіант розглядають композитні адсорбенти, які отримані шляхом імпрегнування гідратуотворюючих солей (наприклад, кальцій хлорид, магній сульфат, літій хлорид) в поринну матрицю цеоліта, силікагелю, вермікуліту [7, с. 112938]. Але подібні методи не дозво-

ляють отримати композит протягом одного циклу. Альтернативним варіантом отримання композитів типу «сіль в поринній матриці» є золь – метод [8, с. 136–140]. Було б доцільно оцінити ефективність адсорбційних установок для кондиціонування повітря на основі композитних адсорбентів.

Постановка завдання. Мета роботи – оцінити ефективність адсорбційних кондиціонерів на основі композитів «силікагель – кристалогідрат». Для досягнення даної мети поставлені наступні задачі:

- визначити основні конструктивні та експлуатаційні характеристики пристрою;
- оцінити основні критерії ефективності роботи адсорбційного кондиціонера;
- порівняти вплив основних факторів, які впливають на ефективність експлуатації пристрою;
- запропонувати режим для ефективної експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Конструкція адсорбційного сонячного кондиціонера наведена на рис. 1.

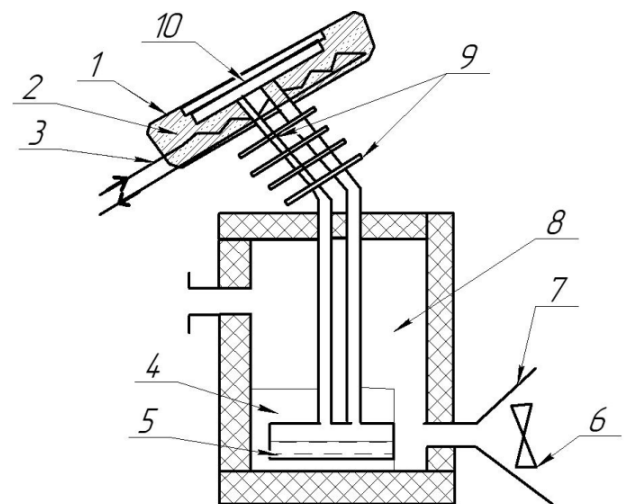


Рис. 1. Адсорбційний кондиціонер: 1 – адсорбер; 2 – теплоакumuлюючий матеріал (адсорбент); 3 – гiдрaвлiчний контур; 4 – водяний акумулятор холоду; 5 – випарник; 6 – вентилятор; 7 – кожух; 8 – холодильна камера; 9 – конденсатор; 10 – прозорий стiльнийковий полiкарбонатний пластик

Основні його модулі включають адсорбер (1), об'єднаний з сонячним колектором, конденсатор (9) та випарник (5), який розміщено в холодильній камері (8). Для зменшення впливу погодних умов на час регенерації в шарі адсорбенту встановлено гiдрaвлiчний контур (3). Холодильна камера об'ємом 3 м³ виготовлена із сталі марки 30Х товщиною 0,5 мм. В якості теплоізоляції використовували пінополістирол.

Адсорбційного кондиціонер, подібно холодильнику, працює відповідно до термодинамічного циклу, який включає стадії адсорбції та випаровування води (власне виробництва холоду), підігрів адсорбента до температури регенерації, десорбції, охолодження адсорбента до температури початку адсорбції.

Водяна пара починає дифундує через конденсатор-адсорбера, депоглинається шаром адсорбента, що сприяє випаровуванню води в випарнику (5), і, отже, відведенню теплоти від холодильної камери (8), і, отже, від охолоджуваного повітря, який прокачується через холодильну камеру за допомогою вентилятора (6). Через великий об'єм води, що міститься в стінках холодильної камери та акумуляторі холоду (4), температура в ній підтримується на рівні 5–10°C протягом 10–20 годин, поки не почнеться наступний цикл. Температура в адсорбері (1) значно зростає за рахунок адсорбції води адсорбентом (2). Для відведення цього тепла вода подається до контура (3). Гаряча вода може бути підведена споживачеві в систему гарячого водопостачання або опалення або використовується для регенерації адсорбційного матеріалу на другому етапі роботи кондиціонера.

Далі, адсорбент (2) нагрівається за допомогою сонячної енергії та/або пропускаючи через контур (3) гарячу воду, нагріту на першій стадії. Отже, вплив погодних умов на час відновлення матеріалу зменшується. Вода збирається в конденсаторі (9) і стікає до випарника (5). Потім починається процес охолодження.

Кількість теплоти, яке необхідно відібрати від охолоджуваного повітря, можна розрахувати за традиційною методикою [9, с. 1–147] як суму теплоти, яка необхідна для компенсації загальних теплоприпливів до приміщення, які виникають за рахунок:

- 1) різниці температур в приміщенні та зовнішнього повітря, а також сонячної радіації;
- 2) експлуатації оргтехніки та побутових приладів;
- 3) людей, які знаходяться в приміщенні.

До підрахованих теплонадходжень додається 20% на невраховані теплоприпливи. Отримана кількість теплоти і приймається, як теплота відведена в холодильній камері. Враховуючи це, визначають масу води, з урахуванням теплоти випаровування води (ΔH_{ev} , кДж/кг) аналогічно адсорбційним холодильним установкам [10, с. 268]:

$$M_{H2O} = (Z_B \cdot Q_2) / H_{ev}, \text{ kg} \quad (1)$$

де Z_B – коефіцієнт покриття. Для підтримки безперервної роботи пристрою приймається 1,05 [10, с. 268].

Для компенсації добової мінливості метеорологічних умов маса робочої рідини збільшується на 50%.

Масу адсорбенту визначають як відношення маси води та граничної адсорбції

Витрати теплоти на регенерацію включають витрати теплоти на підігрів адсорбента та адсорбованої води та десорбцію [10, с. 268]:

$$Q_1 = m_k \cdot C_k \cdot \Delta T_1 + m_w \cdot C_w \cdot \Delta T_1 + m_B \cdot \Delta H_{des}, \text{ кДж} \quad (2)$$

де ΔT_1 – різниця між температурою адсорбенту і температурою регенерації, К; ΔH_{des} – теплота десорбції води, кДж/кг; m_k і m_w – відповідно маса композиту і адсорбованої води, кг; C_k і C_w – теплоємність композиту та води відповідно, кДж / кг · К.

Теплоту для регенерації адсорбента можна постачати за допомогою сонячного колектора. Необхідна площа поверхні сонячного колектора обчислюється за формулою [10, с. 269]:

$$F_k = (Z_k \cdot Q_3) / Q_k, \text{ м}^2 \quad (3)$$

де Z_k – коефіцієнт покриття площі поверхні сонячного колектора, він вводить поправку безперервної роботи холодильника при несприятливих погодних умовах. Залежно від регіону коефіцієнт покриття можна прийняти за 1,5–2,5 (при розрахунках прийнято 2,0). Q_k – кількість теплоти, яка підводиться до адсорбенту на 1 м² площі поверхні колектора, кДж / м².

Основні конструктивні характеристики сонячного колектора, розраховані за рівнянням (1) – (3) для різних холодопродуктивностей представлені в таблиці 1.

Маса адсорбента для заданої холодопродуктивності, вочевидь, майже в два рази більше для композиту «силікагель – натрій ацетат», оскільки його гранична адсорбція майже в два рази менше, ніж у композита «силікагель – натрій сульфат». Витрати теплоти на регенерацію адсорбентів є практично ідентичними, але необхідна маса композита «силікагель – натрій сульфат» менше в два рази, що вимагає менших витрат на його нагрівання, і, отже дещо менших значень площі сонячного колектора.

Критеріями ефективності експлуатації адсорбційного кондиціонеру можуть слугувати холодильні коефіцієнти [10, с. 270–271]:

1) холодильний коефіцієнт циклу, який дорівнює відношенню кількості відведеної теплоти до витрат теплоти на регенерацію;

**Базові характеристики адсорбційного кондиціонера.
Різниця між температурою адсорбенту і температурою регенерації 30 К**

Холодопродуктивність, МДж/добу	Маса води, кг	Адсорбент	Маса адсорбента, кг	Площа сонячного колектора, м ²
358	225,57	Силікагель 20 % – натрій сульфат 80 %	217,56	85,33
		Силікагель 20 % – натрій ацетат 80 %	408,56	85,98
179	112,79	Силікагель 20 % – натрій сульфат 80 %	107,83	42,66
		Силікагель 20 % – натрій ацетат 80 %	202,48	42,98
89,5	56,39	Силікагель 20 % – натрій сульфат 80 %	53,91	21,33
		Силікагель 20 % – натрій ацетат 80 %	101,24	21,49

2) експлуатаційний (сонячний) холодильний коефіцієнт, який визначають як відношення кількості відведеної теплоти та теплоти, яку підведено за допомогою сонячного колектора.

Характеристики композитних адсорбентів сильно впливають на холодильний коефіцієнт. Наприклад, максимальні значення COP_c адсорбційного кондиціонера 1,07–1,11 встановлені для композитних адсорбентів, які містять, мас. %: силікагель – 20 та натрій сульфат натрію – 80.

Вочевидь, підвищення вмісту натрію сульфату в композиті призводить до зменшення його маси, а отже, і кількості тепла, яке потрібно для регенерації. Кількість тепла, яка необхідна для регенерації композиту, визначається різницею температур регенерації та адсорбенту після адсорбції ΔT_1 . Отже, її зменшення приводить до монотонного зростання холодильного коефіцієнта. Максимальні значення COP_c встановлені при ΔT_1 не більше 55–65°C.

Результати розрахунку експлуатаційного холодильного коефіцієнта представлені в таблиці 2, проведені за методикою [10, с. 267–273].

Максимальні значення COP_n спостерігаються у вересні, що відповідає мінімальному сонячному потоку. Вочевидь, основні конструктивні та експлуатаційні характеристики сонячного адсорбційного кондиціонера, які і холодильної установки визначаються властивостями композитного адсорбента.

На холодильний коефіцієнт сильно впливає кількість тепла для регенерації композиту Q_{reg} і, як наслідок, різниця в температурі адсорбенту та температурі регенерації ΔT_1 , яка визначається температурою регенерації (таблиця 3).

По мірі зменшення вмісту силікагелю спостерігається монотонне зростання холодильного коефіцієнту циклу. Максимальні значення COP встановлюються при $\Delta T_1 = 50^\circ\text{C}$ або 20–30°C при використанні композиту «силікагель – натрію сульфат» або «силі-

кагель – натрію ацетат». При застосуванні адсорбентів з нижчими температурами регенерації, наприклад, «силікагель – натрію ацетат» (60°C), можна досягти зменшення теплоти регенерації порівняно з «силікагелем – натрію сульфат» (90°C). Значення експлуатаційного COP для адсорбційних кондиціонерів на основі обох композитів майже рівні.

Таблиця 2

Експлуатаційні холодильні коефіцієнти сонячного адсорбційного кондиціонера на основі композиту «силікагель – натрій сульфат» (різниця температури регенерації та адсорбенту після адсорбції $\Delta T_1 = 55^\circ\text{C}$, холодопродуктивність 3,1 кВт, площа сонячного колектора 22,2 м²)

Місяць	Добовий потік сонячної радіації, МДж/м ²	Теплота, отримана сонячним колектором, МДж	Експлуатаційний холодильний коефіцієнт
Травень	21,56	478,632	0,187
Червень	21,09	468,198	0,191
Липень	21,81	484,182	0,185
Серпень	20,37	452,214	0,198
Вересень	15,87	352,314	0,254

Тим не менше, COP_n адсорбційних холодильників на основі композитного «силікагелю – натрію ацетату» перевершує пристрої, що використовують «силікагель – натрію сульфат», майже на 1%. Очевидно, що це обумовлено нижчою температурою регенерації композитного «силікагелю – натрію ацетату» порівняно з «силікагелем – натрію сульфатом» (Na₂SO₄). В той же час, для досягнення необхідних значень холодопродуктивності протягом циклу маса композиту «силікагель – натрій сульфат» в два рази менше в порівнянні з композитом «силікагель – натрій ацетат», що є результатом більшого значення граничної адсорбції.

**Експлуатаційні холодильні коефіцієнти адсорбційних кондиціонерів на основі композитів
«силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат»**

Склад, %		«Силікагель – натрій сульфат»					«Силікагель – натрій ацетат»				
Силі- кагель	Сіль	Гранична адсорбція, A_{max} , кг/кг	Маса адсорбента, M_{ads} , kg	Теплота регенерації, Q_{reg} , МДж	Площа поверх- ні сонячного колектора, m^2	Експлуатаційний холодильний коефіцієнт, COP_n	Гранична адсорбція, A_{max} , кг/кг	Маса адсорбента, M_{ads} , kg	Теплота регенерації, Q_{reg} , МДж	Площа поверхні сонячного колектора, m^2	Експлуатаційний холодильний коефіцієнт, COP_n
20	80	1.35	41,77	175,77	22,15	0,255	0.756	74,59	169,81	21,40	0,264
40	60	1.06	53,20	176,34	22,22	0,254	0.596	94,61	170,35	21,47	0,263
60	40	0.77	73,23	177,33	22,34	0,252	0.462	122,06	171,09	21,56	0,262
80	20	0.48	117,48	179,52	22,62	0,249	0.330	170,88	172,41	21,73	0,260

Висновки

1. Проведено дослідження процесів експлуатації адсорбційного геліокондиціонера на основі композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат». Визначено основні фактори, які впливають на холодильний коефіцієнт циклу.

2. Показана кореляція між складом адсорбенту та холодильним коефіцієнтом циклу. Показано збільшення холодильного коефіцієнту циклу при зростанні вмісту натрій сульфату в композиті. Підтверджено кореляцію режиму процесу регенерації композита та холодильним коефіцієнтом установки. Встановлено зростання величини холодильного коефіцієнту при зменшенні різниці температур адсорбенту та температури регенерації ΔT_1 .

3. Встановлено, що максимальні значення холодильного коефіцієнта спостерігалися відповідають $\Delta T_1 = 55^\circ\text{C}$ для композитів, які містять близько, мас. %: силікагель – 20 та натрій сульфат – 80. Проведено розрахунок експлуатаційного холодильного коефіцієнта на основі композитного сорбенту «силікагель – натрій сульфат», що показала залежність від середньодобового значення величини сонячного випромінювання протягом сезону (травень – вересень).

4. Підтверджено перспективність використання композитів «силікагель – CH_3COONa » та «силікагель – натрій сульфат». Встановлено оптимальний склад композиту, 80% солі та 20% силікагелю, який відповідає мінімальним розмірам адсорберу.

Список літератури:

1. Wajid N.M., Abidin A.M.Z., Hakemzadeh M., Jarimi H., Fazlizan A., Fauzan M.F., Ibrahim A., Al-Waeli A.H.A., Sopian K. Solar adsorption air conditioning system – Recent advances and its potential for cooling an office building in tropical climate. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 27. P. 101275.
2. United Nations Environment Programme, The importance of energy efficiency in the refrigeration and heat pump sectors. *Environ. Program. Brief. Note A*. 2018. no. May. P. 1–15.
3. Lakshmanan S., Maurya V.K., Kumar A., Bhati M. Mitigation potential of banned hydrofluorocarbons (HFCs) towards global warming – An assessment of Kigali Amendment in the Indian scenario. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 428. P. 139315
4. Беляновська, О. А., Пустовой, Г. М., Сухий, К. М., Губинський, М. В., Сухий, М. П., Дорошенко, О. В., Сергієнко, Я. О. Експлуатація адсорбційних холодильних установок на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» для зберігання сільськогосподарської продукції. Холодильна техніка та технологія. 2019. Т. 55(3). С. 165–171.
5. Freni, A., Maggio, G., Sapienza, A., Frazzica, A., Restuccia, G., Vasta, S. Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 104. P. 85–95
6. Jarimi H., Powell R., Riffat S. Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2020. Vol. 15. P. 253–276.
7. Wenjing W., Luxi Y., Giulio S., Yongliang L., Cher H. L., Xianfeng F. A two-stage sorption strategy to improve heat storage performance of salt/porous matrix composites. *Solar Energy*. 2024. Vol. 282. P. 112938.

8. Беляновська О.А., Сухий К.М., Пустовой Г.М., Єрємін А.О., Сухий М.К., Фролова Л.А. Критерії підбору робочих пар для адсорбційних холодильних пристроїв. *Вчені записки Таврійського Національного університету. Сер. Технічні науки*. 2022. № 6. С. 136–140.

9. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлового господарства України. 1996. 147 с.

10. Sukhyu K.M., Belyanovskaya E.A., Sukhyu M.P. Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: Emerging Research and Opportunities. San Francisco, USA, 2020. 328 pp.

Belyanovskaya E.A., Sukhyu K.M., Serhienko Ya.O., Yeromin A.O., Prokopenko O.M., Frolova L.A. OPERATIONAL PROCESSES OF ADSORPTION CONDITIONER BASED ON “SILICA GEL – SODIUM SULFATE” AND “SILICA GEL – SODIUM ACETATE” COMPOSITE ADSORBENTS

The article is focused on the study of the processes of operation of the adsorption solar conditioner based on composite adsorbents 'silica gel – sodium sulfate' and 'silica gel – sodium acetate'. The main factors affecting the coefficient of energy performance for cooling of the cycle have been revealed in the present article. The correlation between the composition of the adsorbent and the coefficient of energy performance for cooling of the cycle was confirmed. It is shown that the coefficient of energy performance for cooling of the cycle increases when the content of sodium sulfate or sodium acetate in the composite adsorbent is increased. The correlation of the mode of the composite regeneration process and the coefficient of energy performance for cooling of the device was confirmed. An increase in the value of the coefficient of energy performance for cooling was established with a decrease in the temperature difference of the adsorbent and the regeneration temperature ΔT_1 . The influence of the composition of the composite on the coefficient of energy performance for cooling of the cycle was analyzed. The correlation of the mode of the composite regeneration process and the coefficient of energy performance for cooling of the installation is shown. It was established that the maximum values of the coefficient of energy performance for cooling correspond to the difference between the temperature of the adsorbent and the temperature of regeneration no more than 55°C for composites containing about, wt. %: silica gel – 20 and salt – 80, which corresponds to the minimum size of the adsorber. The operational coefficient of energy performance for cooling of the adsorption conditioner based on the composite adsorbent 'silica gel – sodium sulfate' during the season (May – September) was evaluated. Its dependence on the average daily value of solar radiation is established. The operational characteristics of adsorption air conditioners based on 'silica gel – sodium sulfate' and 'silica gel – sodium acetate' composites are compared. The mass of the composite 'silica gel – sodium sulfate' is shown to be more than 2 times less compared to the composite 'silica gel – sodium acetate' due to higher maximal adsorption, and the area of the solar collector is approximately 1 m² more when the adsorbent silica gel – sodium sulfate' used. The operational coefficient of energy performance for cooling of the adsorption conditioner when the composite 'silica gel – CH₃COONa' used is stated to be one-percent more as compared to the device based on 'silica gel – Na₂SO₄'. The prospects of using 'silica gel – sodium acetate' and 'silica gel – sodium sulfate' composites have been confirmed.

Key words: adsorptive conditioner, composite adsorbent, maximal adsorption, refrigerant, energy efficiency.

УДК 536.248.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/27>**Ніколаєнко Ю.Є.**

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хайрнасов С.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хоперський С.В.

НГО «Асоціація фахівців цивільного захисту»

Сорокін В.М.

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

Пекур Д.В.

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова
Національної академії наук України

Козак Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ковальов О.С.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

РОЗРОБКА НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОТУЖНОГО СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ ДВОФАЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Освітлення зон виникнення надзвичайних ситуацій або режимних територій в темний час є актуальним завданням, оскільки від нього залежить збереження людського життя та безпека суспільства. Дана стаття присвячена вирішенню проблеми створення потужного світлодіодного освітлювального пристрою, призначеного для застосування в зонах виникнення надзвичайних ситуацій та для можливого оснащення ним спеціальної техніки, що використовується для охорони державного кордону, з метою підвищення ефективності освітлення територій та виявлення об'єктів на великій відстані. Враховуючи високі вимоги по надійності та технологічності до освітлювальної техніки спеціального призначення, розроблення вітчизняних потужних світлодіодних освітлювальних пристроїв, що відповідають цим вимогам, є важливою та актуальною задачею. У статті розкрито особливості нової конструкції та принцип роботи такої системи охолодження. Відзначено, що більше 60 % електричної енергії, яку споживають сучасні потужні світлодіодні матриці, перетворюється у теплоту, що підвищує їх температуру та знижує надійність роботи і відповідно вимагає застосування високоефективних систем охолодження на основі двофазних технологій. У статті наведено результати розробки системи охолодження світлодіодного освітлювального пристрою з електричною потужністю не менше 500 Вт, побудованої на основі алюмінієвих радіаторів з вмонтованими під кутом гравітаційними тепловими трубами з різьбовим випарником. Визначено, що використання запропонованої конструкції може забезпечити розсіювання до 360 Вт теплоти за рахунок природньої конвекції у навколишнє середовище при забезпеченні максимальної температури на корпусі світлодіодної матриці не більше 100 °С. Така конструкція системи охолодження має високу надійність, забезпечує тривалу безумну автономну роботу освітлювального пристрою з живленням від акумуляторної батареї і дозволяє проводити періоди тиші для прослуховування звуків з під завалів. Встановлено, що перевагою запропонованої конструкції є її простота та технологічність виготовлення в умовах досвідного виробництва.

Ключові слова: освітлювальний пристрій, світлодіодна матриця, система охолодження, тепла труба, теплообмін, моделювання.

Постановка проблеми. Освітлювальні пристрої є критичними засобами для проведення в темний час доби аварійно-рятувальних робіт та інших невідкладних дій в зоні виникнення надзвичайних ситуацій, оскільки потрібно забезпечити достатньо високий рівень освітленості в продовж всього часу виконання робіт. Іншою важливою сферою застосування освітлювальних пристроїв є оснащення ними спеціальної техніки, призначеної для охорони кордону, що дозволить освітлювати прикордонну територію з необхідним рівнем освітленості та виявляти об'єкти на великій відстані. Тому, створення нового вітчизняного більш потужного освітлювального пристрою на основі енергоефективних світлодіодних джерел світла провідних компаній світу є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання енергоефективних світлодіодних джерел світла на основі GaN [1, с. 2217, с. 2218] дозволяє підвищити рівень освітленості та створювати потужні освітлювальні пристрої широкого призначення [2, с. 1]. В той же час, біля 60 % електричної енергії, яку споживають сучасні світлодіодні COB (Chip-on-board) матриці, перетворюється у теплоту, що підвищує їх температуру та знижує надійність [3, с. 777, с. 778] та світлову ефективність [4, с. 2]. Тому створення нового вітчизняного потужного світлодіодного освітлювального пристрою, що характеризується значним тепловиділенням та високим значенням густини теплового потоку, потребує вирішення задачі забезпечення заданих температурних режимів. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є використання в системі охолодження двофазних теплопередавальних пристроїв (термосифонів [5], теплових труб [6], парових камер [7], тощо), ефективна теплопровідність яких на порядки перевищує теплопровідність металів [8, с. 2], що дозволить відвести та розосередити на більшу поверхню теплообміну значні локальні теплові потоки.

На даний час відомо використання під час виконання аварійно-рятувальних робіт світлодіодних освітлювальних пристроїв у вигляді світлодіодних стаціонарних прожекторів [2, с. 1; 9, с. 1]. Прожектор пошуковий мобільний ДО-175-223-АТ [9, с. 1] вітчизняного виробництва має невелику потужність 175 Вт, світловий потік 21525 лм. Він розрахований на підключення до джерела постійного струму номінальної напруги 12 В. Прожектор складається з безпосередньо прожектора зі світлодіодними джерелами світла компанії Cree в кількості 30 одиниць та триноги – металевого штатива для встановлення на горизонтальній пло-

щині. Значення корельованої колірної температури знаходиться в межах від 3750 К до 4250 К. Значення індексу кольоропередачі не менше 70. Перевагами є пасивна система охолодження, що забезпечує можливість безшумної роботи, та можливість автономної роботи від джерела живлення з напругою 12 В.

Більш потужний світлодіодний стаціонарний прожектор далекого світла ПСМЧ-250 побудовано на основі 4 світлодіодних матриць загальною потужністю 250 Вт з світловим потоком 27500 лм [2, с. 1]. Прожектор спеціального призначення ПСМЧ-250 виконано у вигляді циліндра діаметром 170 мм довжиною 270 мм, закріпленого на каркасі з можливістю зміни кута нахилу. Чотири потужні матриці у парі з лінзою 120 градусів дають широкий засвіт прилеглої території. Значення індексу кольоропередачі – більше 80, колірної температури – від 3000 К до 6000 К. Конструкція прожектора передбачає встановлення його на спеціальні транспортні засоби, типу пожежних машин та ін. Для підвищення освітленості території відомо встановлення на одній пожежній машині поряд двох таких прожекторів. Живлення прожектора здійснюється від джерела з номінальною напругою 220 В. Тепловий режим COB матриць забезпечується активним повітряним охолодженням за допомогою вбудованого вентилятора, що створює певний додатковий рівень акустичного шуму та зменшує надійність.

Сучасні світлодіодні COB матриці провідних виробників світу: Citizen (Японія), Samsung (Південна Корея), Cree (США) на сьогодні вже мають загальну потужність 200–500 Вт, що дозволяє побудувати нові, більш потужні, вітчизняні світлодіодні освітлювальні пристрої. Однак, при цьому першочерговим завданням є створення нових, більш ефективних, систем охолодження потужних світлодіодних COB матриць.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення конструкції системи охолодження для вітчизняного світлодіодного освітлювального пристрою з більшою щонайменше вдвічі електричною потужністю (більше 500 Вт) та світловим потоком більше 55000 лм, здатного автономно та надійно працювати протягом не менше 5 годин при температурі навколишнього середовища від -30 °С до +40 °С без застосування активних систем охолодження.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення надійної роботи освітлювального пристрою з підвищеною тепловою потужністю перспективним є використання систем охолодження

COB матриць на основі двофазних теплопередавальних пристроїв (теплових труб, термосифонів та парових камер), передача теплоти в яких здійснюється за рахунок замкнутого випарувально-конденсаційного циклу теплоносія. Завдяки цьому, їхня ефективна теплопровідність перевищує теплопровідність міді більше, ніж на порядок. Принцип роботи теплової труби (ТТ) показано на рис. 1, на якому стрілками показано підведення та відведення теплоти. Використання ТТ з підвищеною ефективною теплопровідністю для передачі теплоти з мінімальним тепловим опором від потужних COB матриць до розвинених теплообмінних поверхонь, розташованих в конструктивно зручному місці, дозволяє підвищити ефективність системи охолодження. Даний принцип було покладено в основу нової конструкції системи охолодження світлодіодного освітлювального пристрою спеціального призначення.

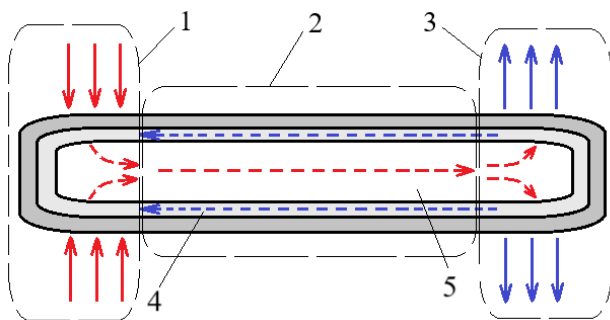


Рис. 1. Схема передачі теплоти за допомогою теплової труби: 1 – зона нагріву (випаровування); 2 – зона транспорту; 3 – зона охолодження (конденсації); 4 – капілярно-пориста структура; 5 – паровий простір

Нова конструкція системи охолодження потужного світлодіодного освітлювального пристрою на основі ТТ. Для використання в системі охолодження нового потужного світлодіодного освітлювального пристрою (рис. 2) було обрано найбільш просту та технологічну у виготовленні в умовах дослідного виробництва конструкцію ТТ – гравітаційну ТТ. З метою збільшення кількості центрів пароутворення і інтенсифікації процесу кипіння теплоносія всередині ТТ на внутрішній поверхні корпусу ТТ в зоні випаровування виконано різьбові канавки з дрібним кроком (0,5 мм). Потужний світлодіодний освітлювальний пристрій містить опорну основу 1 з підтримуючим елементом 2, світлодіодне джерело світла 3, встановлене на монтажній пластині 4 з теплопровідного матеріалу (алюмінію або міді), та двофазні теплопередавальні елементи, виконані у вигляді прямих гравітаційних ТТ 5, наприклад,

циліндричної форми, які можуть біти виконані з міді або алюмінію. Гравітаційні ТТ 5 розміщені по обидві бокові сторони від світлодіодного джерела світла 3 та приєднані з забезпеченням теплового контакту одним своїм кінцем до монтажної пластини 4 з світлодіодним джерелом світла 3. Світлодіодне джерело світла 3 складається з чотирьох світлодіодних COB матриць типу CITIZEN CLU05Q з максимальною електричною потужністю кожного до 300 Вт. Іншим кінцем ТТ 5 приєднані з забезпеченням теплового контакту до групи бічних теплообмінників 6. Бічні теплообмінники 6 та підтримуючий елемент 2 виконано у вигляді відрізків серійного алюмінієвого радіаторного профілю з прямими вертикальними ребрами 7 на одній стороні та канавками напівциліндричної форми під гравітаційні ТТ 5 на другій, пласкій, стороні основи 8. Пласка частина підтримуючого елемента 2 покриває частини ТТ в області монтажної пластини з світлодіодним джерелом світла з забезпеченням теплового контакту, завдяки введенню в контактні зони шару теплопровідної пасти та механічного скріплення підтримуючого елемента 2 з монтажною пластинною 4. Нижня і верхня грані груп радіаторних профілів бічних теплообмінників 6, канавки під ТТ та ТТ 5 розташовано під кутом φ нахилу до горизонту з перевищенням зони конденсації над зонами випаровування. При цьому значення кута φ нахилу обрано 20° . Зони конденсації гравітаційних ТТ 5 розташовано в канавках напівциліндричної форми в зустрічно орієнтованих пласких частинах кожних двох серійних радіаторних профілів кожної групи бічних теплообмінників 6 з прямими вертикальними ребрами 7 (див. рис. 2(в)) та механічно закріплено між радіаторними профілями шляхом стягування їх між собою за допомогою гвинтів 9. При цьому забезпечення теплового контакту між ТТ та радіаторними профілями здійснено за допомогою теплопровідної пасти. Навколо світлодіодного джерела світла 3 встановлено рефлектор 10 для формування та спрямування світлового потоку в заданому напрямку.

Робота запропонованої системи охолодження потужного світлодіодного освітлювального пристрою на основі ТТ. При подачі електричного живлення з заданими параметрами на світлодіодне джерело світла 3 значна частина електричної енергії, що споживається, перетворюється в теплоту, що підвищує температуру напівпровідникових кристалів COB матриць та його теплопровідної основи. За рахунок надійного механічного та теплового контакту між теплопровідною осно-

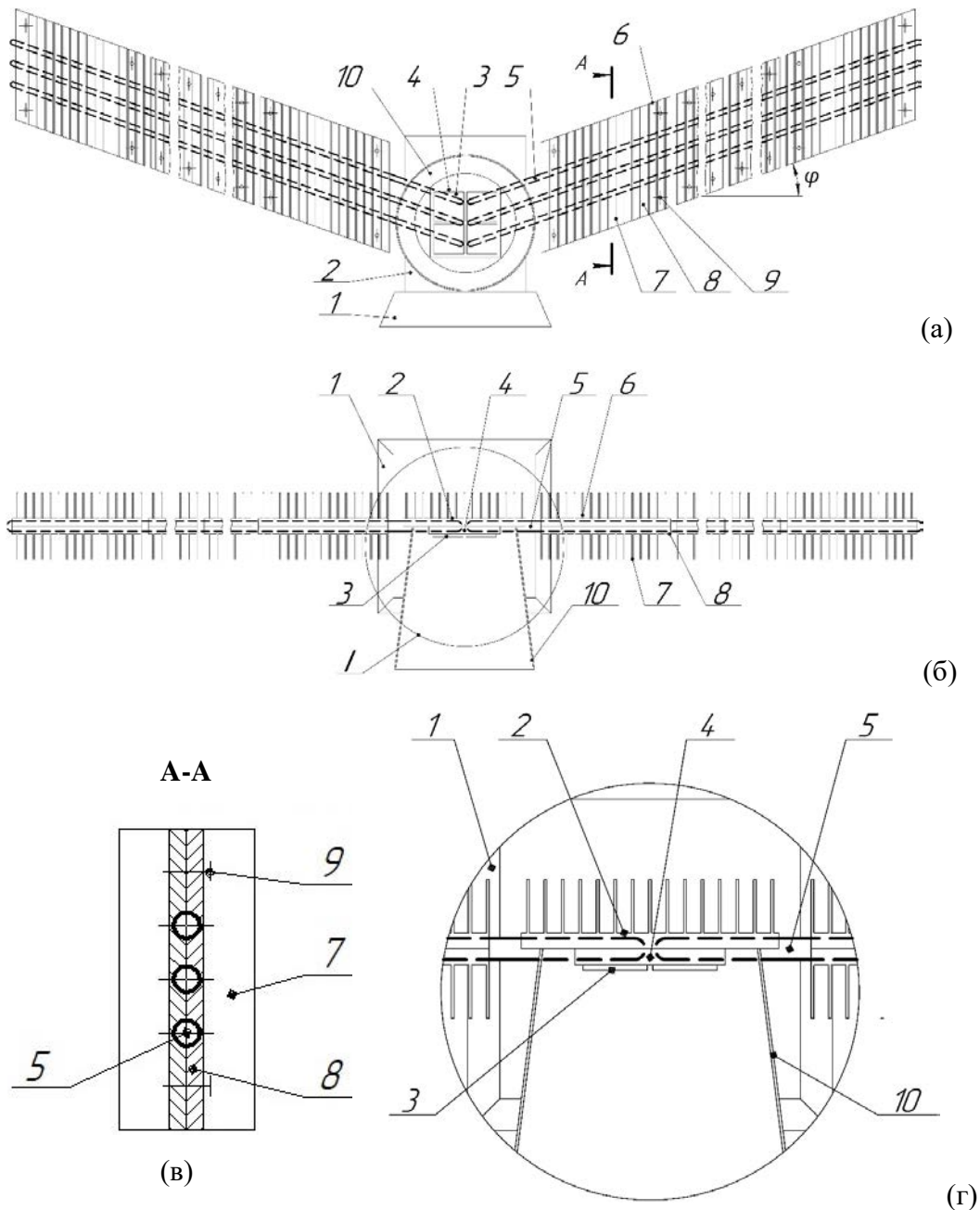


Рис. 2. Конструктивна схема потужного світлодіодного освітлювального пристрою: (а) – вид спереду; (б) – вид зверху; (в) – вид А-А, збільшено, закріплення ТТ в радіаторних профілях; (г) – вид I (збільшено), вузол з’єднання СОВ матриць з монтажною пластиною, тепловими трубами та підтримуючим елементом

вою світлодіодного джерела світла та монтажною пластиною 4 з вбудованими в неї зонами випаровування ТТ 5 та плоскою частиною підтримуючого елемента 2 у вигляді радіаторного профілю тепловий потік від СОВ матриць передається до монтажною пластиною 4, а від неї – до зон випаровування ТТ та теплообмінної поверхні ребер підтримуючого елемента 2. Рідкій теплоносії в зоні випаровування ТТ 5 закипає, поглинаючи підведену теплоту, а пара теплоносія рухається в більш

холодну зону конденсації, де конденсується і виділяє поглинену при пароутворенні теплоту, нагріваючи при цьому стінку ТТ в зоні конденсації. Повернення сконденсованого теплоносія із зони конденсації до зони випаровування при реалізації замкненого випаровувально-конденсаційного циклу здійснюється за рахунок дії сили гравітації. Завдяки високій ефективності передачі теплоти замкненим випаровувально-конденсаційним циклом всередині гравітаційних ТТ 5,

віділена теплота від їхніх зон конденсації передається пласким теплопровідним основам 8 груп радіаторних профілів бічних теплообмінників 6 та їхнім вертикальним ребрам 7 і ефективно відводиться в оточуюче повітря вільною конвекцією, що сприяє зменшенню температури напівпровідникових кристалів СОВ матриць та забезпечує надійну роботи освітлювального пристрою.

Ефективність запропонованої системи охолодження. На етапі розробки конструкції ефективність запропонованої системи охолодження оцінювалась методом комп'ютерного моделювання в програмному пакеті Flotherm.

При оцінці враховувались наступні основні вхідні дані:

1. Максимально-допустима температура на поверхні корпусу СОВ матриці 100 °С.

2. Сумарний тепловий потік: 1) 360 Вт (72% від максимальної електричної потужності, яка дорівнює 500 Вт, що відповідає рекомендаціям більшості виробників СОВ матриць (від 70% до 75%)); 2) 300 Вт (60% від максимальної електричної потужності, яка дорівнює 500 Вт, що відповідає результатам додаткових проведених досліджень визначення оптичної ефективності).

3. Габарити однієї СОВ матриці: 38 мм × 38 мм. До складу конструкції системи охолодження входить 4 таких СОВ матриць.

В ході моделювання було проведено: верифікацію комп'ютерної моделі алюмінієвого радіатора при природній конвекції на основі даних додаткових експериментальних досліджень; аналіз існуючих алюмінієвих радіаторних профілів на ринку України і вибрано найбільш оптимальний з точки зору ефективності, маси та технологічності конструкції системи охолодження; оцінку впливу геометричних розмірів радіатора (співвідношення довжини та висоти); перевірку використання додаткових конструктивних підходів щодо підвищення ефективності природньої конвекції (наприклад, закритих каналів); оцінку впливу локальності теплопідводу та його розташування на основі радіатора; аналіз впливу коефіцієнту теплопровідності теплопровідного матеріалу в зонах контакту і його товщини, а також теплового опору теплових труб. На основі проведеного аналізу була запропонована базова конструкція системи охолодження у відповідності до рис. 2 з основними конструктивними характеристиками, що наведені у таблиці 1.

За результатами комп'ютерного моделювання було встановлено, що запропонована система охолодження дозволяє забезпечити температуру СОВ

матриць не вище +100°С при температурі навколишнього повітря +40°С, забезпечуючи відвід теплового потоку:

– 360 Вт при використанні 6 груп радіаторних профілів (по 3 групи в кожному бічному теплообміннику) при їх сумарній масі 12,3 кг;

– 300 Вт при використанні 4 груп радіаторних профілів (по 2 групи в кожному бічному теплообміннику) при їх сумарній масі 8,5 кг.

Висновки. Перевагами запропонованої конструкції вітчизняного потужного (500 Вт) світлодіодного освітлювального пристрою з системою охолодження на основі гравітаційних теплових труб з різьбовим випарником є спрощення та здешевлення конструкції при виготовленні його в сучасному дослідному виробництві при одночасному забезпеченні ефективного безшумного пасивного повітряного охолодження СОВ матриць з світловим потоком більше 55000 лм. Виготовлення ТТ і в цілому запропонованого потужного світлодіодного освітлювального пристрою може бути реалізовано в дослідному виробництві на існуючих промислових підприємствах з використанням існуючого технологічного обладнання без додаткових витрат на придбання спеціалізованого технологічного обладнання.

Таблиця 1

Основні конструктивні характеристики системи охолодження

Характеристики	Значення
Матеріал радіатора	алюміній
Ширина профілю радіатора (для однієї групи), мм	122
Висота радіатора, мм	200
Висота ребер радіатора, мм	31,5
Крок між ребрами, мм	8
Теплопровідність теплопровідного матеріалу між світлодіодним джерелом світла та монтажною пластиною, Вт/(м·°С)	15,0
Товщина шару теплопровідного матеріалу між світлодіодним джерелом світла та монтажною пластиною, мм	0,5
Теплопровідність теплопровідного матеріалу між тепловими трубами та монтажною пластиною чи радіатором, Вт/(м·°С)	4,6
Товщина шару теплопровідного матеріалу між тепловими трубами та монтажною пластиною чи радіатором, мм	0,8
Кількість теплових труб	8
Матеріал теплових труб	мідь
Діаметр теплових труб, мм	12
Тепловий опір теплових труб, °С/Вт	0,3

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2023.04/0055).

Список літератури:

1. S. Nakamura, M. R. Krames History of Gallium–Nitride-Based Light-Emitting Diodes for Illumination. *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101(10). P. 2211–2220. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2274929
2. Прожектор світлодіодний стаціонарний дальнього світла на 4 матриці 250 Вт 27500 Лм ПСМЧ-250. https://vash-market.com.ua/p1835654888-prozhektor-svetodiodnyj-statsionarnyj.html?srsltid=AfmBOopt2veIoOhGACc8QFt-5Wu4gzweELbdeXmzx_mY3wjq_DDOB7mY
3. Chang, M.-H., Das D., Varde P. V., Pecht M. Light emitting diodes reliability review. *Microelectron. Reliab.* 2012. Vol. 52(5). P. 762–782. DOI: 10.1016/j.microrel.2011.07.063
4. L. Xiang, Y. Cheng, X. Yu, Y. Fan, X. Yang, X. Zhang, B. Xie, X. Luo. Highperformance thermal management system for high-power LEDs based on double-nozzle spray cooling, *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 231. Art. 121005. P.1–10. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121005>
5. A. Elkholly, R. Kempers. A Compact Integrated Thermosyphon Heat Sink for Power Electronics Cooling. *Proc. of the ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 8: Heat Transfer and Thermal Engineering. Salt Lake City, Utah, USA. November 11–14, 2019. V008T09A085. ASME. P. 1–9. <https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11777>
6. S.U. Khalid, H. Babar, H. Ali, M.M. Janjua, M. Ali. Heat pipes: progress in thermal performance enhancement for microelectronics. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2021, Vol. 143, P. 2227–2243. DOI: 10.1007/s10973-020-09820-7
7. S. Chitnis, R. Dayal, A. Arora. Deployment of vapour chambers for electronic heat dissipation: state-of-the-art. *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*. 2022, Vol. 236(16). P. 9316–9340. DOI: 10.1177/09544062221091464
8. R. Wrobel, D. Reay. Heat pipe based thermal management of electrical machines – A feasibility study. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2022. Vol. 33. Art. 101366. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101366>
9. “Прожектор ДО-175-223-АТ” 175 Вт, 21 500 Лм. <https://www.atilos.com.ua/ru/svetodiodnoe-osveshchenie/prozhektory-obshchego-naznacheniya/prozhektor-poiskovyj-mobilnyj.html>

Nikolaenko Yu.E., Khairnasov S.M., Khoperskyi S.V., Sorokin V.M., Pekur D.V., Kozak D.V., Kovalev O.S. DEVELOPMENT OF A NEW DESIGN OF COOLING SYSTEM BASED ON TWO-PHASE TECHNOLOGIES FOR A HIGH-POWER LED LIGHTING DEVICE

Illumination of emergency situations or regime territories in the dark time is an urgent task, since the preservation of human life and the safety of society depend on it. This article is devoted to solving the problem of creating a high-power LED lighting device, which is intended to use in areas of emergency situations and to equip of special equipment used for the protection of state border; with the aim to increase the efficiency of lighting areas and detecting objects at a long distance. Considering the high reliability and manufacturability requirements for special-purpose lighting equipment, the development of domestic high-power LED lighting devices that meet these requirements is an important and urgent task. The article describes the features of the new design and the principle of operation of such a cooling system. It is noted that more than 60% of the electrical energy of modern high-power LED matrices is converted into heat, which increases their temperature and reduces the reliability and, accordingly, requires the use of highly efficient cooling systems based on two-phase technologies. The article presents the design results of an LED lighting device cooling system with an electrical power at least 500 W, built on the basis of aluminum heatsinks with integrated gravity-assisted heat pipes with a threaded evaporator. It was determined that the use of the proposed design can ensure the heat dissipation up to 360 W by the natural convection to the environment while ensuring the maximum temperature on the LED matrix cases not more than 100°C. This design of the cooling system has high reliability, ensures long-term silent autonomous operation of the lighting device powered by a battery and allows for periods of silence to listen to sounds from under rubble. It was established that the advantage of the proposed design is its simplicity and manufacturability in experimental production conditions.

Key words: lighting device, LED matrix, cooling system, heat pipe, heat exchange, modeling.

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.097.243.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/28>

Єфімова В.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Юсіна Г.Л.

Товариство з обмеженою відповідальністю «Технічний університет
«Метінвест Політехніка»

Смірнов Ю.О.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
Національної академії наук України

Пилипенко Т.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВСТАНОВЛЕННЯ ХІМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ МОДИФІКАЦІЇ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В РОЗПЛАВІ СТАЛІ АНАЛІТИЧНИМИ МЕТОДАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому дослідженні показано, що сталі, які були розкислені алюмінієм та містять у своєму складі розчинену сірку, під час обробки кальцієм утворюють твердий сульфід кальцію, при цьому СаО буде присутній у вигляді алюмінатів кальцію, з відповідною зміною складу в залежності від температури.

З'ясовано, що для кожної стадії реакцій перетворення алюмінатів кальцію рівноважні концентрації продуктів реакції будуть мати сталі значення за умови сталості коефіцієнтів активності сірки та алюмінію відповідно.

В дослідженні наведено зміну рівноважних продуктів реакції в результаті перебігу хімічного процесу та встановлено, що на останніх стадіях процесу підвищується активність СаО та знижується активність Al₂O₃.

В процесі досліджень було встановлено кінетичну модель перебігу гетерогенного процесу модифікування розплаву сталі кальцієм.

У наших дослідженнях встановлено, що механізм розчинення кальцію у рідкій сталі проходить крізь утворення проміжної сполуки. Визначено оптимальну концентрацію кальцію у межах 1 ppm, що буде інгібітором процесу утворення CaS-Al₂O₃.

Показано, що лімітуючою стадією процесу буде транспортування Al та S від включень у об'єм рідкої сталі.

В роботі показано, що для підтвердження аналітичного аналізу та перевірки стадії, що лімітує процес, а саме реакція CaS-Al₂O₃, за рахунок розчиненого Ca у якості проміжної сполуки, полягає у розрахунку швидкості перетворення включень.

Наведено, що концентрації розчинених алюмінію та сірки, що перебувають у рівновазі з включенням дуже малі, а загальний час, що необхідний для модифікації включень, на багато разів перевищував рівноважні концентрації. Для врахування цих умов нами було створено кінетичну модель для оцінки часу, що дозволила визначити стадію, що лімітує швидкість загального процесу модифікування включень.

В результаті проведених лабораторних досліджень та промислових випробувань встановлено механізм модифікації включень глинозему шляхом вивчення еволюції включень після обробки кальцієм для плавок з різним вмістом сірки.

Показано, що розплав, який містить 40 ppm сірки та більше, утворює перехідну речовину CaS, що витрачається з часом та викликає модифікацію включень глинозема.

З'ясовано, що підвищений вміст сірки у діапазоні 40–100 ppm чинить невеликий вплив на модифікацію глинозема.

Промислові випробування показали довели, що розплави сталі з низьким вмістом сірки (7 ppm) сприяє утворенню перехідних фаз, які модифікують тверді включення глинозему. утворюються невеликі включення CaO після обробки кальцієм, за яким утворюються перехідні фази, що реагують з глиноземом.

Встановлено, що найкращі результати модифікування твердих включень глинозему спостерігаються при невеликому вмісті сірки.

Ключові слова: модифікація, неметалеві включення, термодинамічні розрахунки, гетерогенний процес, рівноважний стан, дифузія.

Постановка проблеми. Відомо, що обробка кальцієм часто застосовується при виробництві сталей, що розкислені алюмінієм. Кальцій вводиться у рідку сталь для перетворення включень глинозема у рідкі чи частково рідкі алюмінати кальцію. Застосування цього методу дозволяє уникнути заростання сталерозливного стакану під час безперервного розливання. Цей метод є дуже ефективним та поширеним в процесі модифікації включень, а саме їх переведення у рідкий стан. При цьому на сьогоднішній день недостатньо вивчена кінетика процесу модифікування, а саме невідомо, яка стадія визначає швидкість загального процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що тверді включення великих розмірів Al_2O_3 впливають на вихід та експлуатаційні характеристики сталі. Отже для модифікації цих включень використовують кальцій, який покращує експлуатаційні характеристики готової продукції [1]. При цьому твердий глинозем перетворюється у алюмінати кальцію, які у розплаві сталі перебувають у рідкому стані [1, 2].

Вивченню кінетики модифікування включень у розплаві сталі присвячено багато досліджень [1-4].

Так у роботах [3-6] було досліджено кінетику модифікації з метою встановлення точної кількості додавання кальцію та механізму модифікації. Авторами цих робіт було встановлено кінетичну модель для оксидів та сульфідів в процесі обробки кальцієм. Ця модель була основана на тому, що швидкість внутрішньої дифузії включень дуже висока, а відповідно, це свідчить про перебіг процесу у кінетичній області.

У роботах [7, 8] було встановлено, що процес утворення рідких включень в процесі модифікації Al_2O_3 є реакцією першого порядку.

Дослідження [9, 10] свідчать, що модифікація включень, які були оброблені кальцієм, покращується за рахунок скорочення часу реакції після обробки. В цих дослідженнях встановлено, що стадія, яка визначає швидкість загального процесу є хімічною реакцією між глиноземом та рідким алюмінатом кальцію.

В роботі [11] показано, що кінетична модель модифікації включень, враховує відновлення кальцію у шлаковій фазі, швидкість розчинення кальцію у сталі, масоперенос у прикордонному шарі та дифузії розчиненої речовини у шарі продукту.

Отже, як впливає з огляду літературних джерел, кінетична модель модифікації неметалевих включень носить суперечливий характер і потребує додаткових досліджень, а саме, встановлення області перебігу процесу модифікування та його часу.

Постановка завдання. Метою даного дослідження було встановлення механізму модифікації неметалевих включень у розплаві сталі при додаванні кальцію.

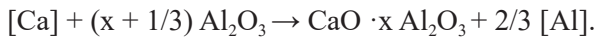
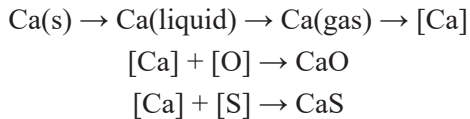
Реалізація поставленої мети здійснювалась шляхом вирішення наступних завдань:

- проведення лабораторних плавок з додаванням кальцію у якості модифікатору;
- підтвердження даних лабораторних досліджень промисловими експериментами;
- аналітичне дослідження отриманих зразків металу з використанням металографічних методів.

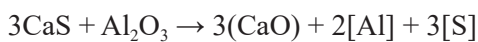
Виклад основного матеріалу досліджень. Відомо, що виробництво чистої сталі включає контроль, усунення чи модифікацію неметалевих включень. У сталях, що були розкислені алюмінієм основним типом неметалевих включень є глинозем (Al_2O_3). Для модифікації неметалевих включень використовують обробку кальцієм, в результаті чого утворюються включення алюмі-

нію утворюють алюмінати кальцію, які можуть повністю або частково бути у рідкому стані в залежності від вмісту CaO.

Після додавання кальцію у розплаві сталі з твердими неметалевими включеннями Al_2O_3 відбуваються наступні хімічні процеси:



Дані робіт [.....] свідчать, що при додаванні кальцію утворюється проміжна сполука CaS у якості проміжної фази, яка реагує з глиноземом у відповідності хімічної реакції:



Завдяки тому, що утворюється перехідна фаза CaS, сірка у сталі може сприяти модифікації шляхом захоплення кальцію, який потім далі реагує з Al_2O_3 . За даними роботи [.....] при вмісті загального кисню 20 ppm у сталі (в основному у формі глинозема $[Al_2O_3]$) мінімальна кількість кальцію, що необхідна для перетворення включень глинозема у рідкі алюмінати кальцію буде становити наближено 13 ppm, що відповідає мінімуму 10 ppm S, яке необхідне для захоплення кальцію, який було додано. При цьому, в сталі, яка містить менш 10 ppm S модифікація включень буде перебігати за іншим механізмом.

Отже метою нашої роботи була перевірка утворення та ролі перехідного сульфїду кальцію шляхом аналізу зміни розміру, форми і складу включень після обробки кальцієм.

В наших дослідженнях ми використовували сталь, що була розкислена алюмінієм з вмістом сірки від 7 ppm до 100 ppm.

Нами було враховано, що утворення сульфїду кальцію може відбуватися декількома шляхами:

- 1) утворення стабільного CaS в розплаві сталі, що має великий вміст сірки та модифікована надмірною кількістю кальцію;
- 2) утворення кільця CaS навколо модифікованого алюмінату кальцію в процесі твердіння;
- 3) перехідне утворення CaS у контакті з немодифікованими включеннями.

В наших дослідженнях ми розглядали включення, що утворюються за механізмом 2 та 3. Включення цих типів легко було ідентифікувати.

Далі нами було проаналізовано лабораторні розплави та промислові плавки зразків, які були відібрані після розкислення алюмінієм в різний час після обробки кальцієм.

Зразки було проаналізовано на електронному мікроскопі для визначення форми, розміру та складу включень.

Для наших дослідів було використано розплав електролітичного заліза з діаметром шматків 12 мм, що було розкислене алюмінієм 99,99% чистоти з розміром частинок 5 мм. Обробку кальцієм проводили порошком дисилїду кальцію ($CaSi_2$). Плавку заліза проводили у тиглі, що виконаний з чистого MgO. Для перевірки впливу сірки в розплаві на степінь модифікування оксидних включень було використано сульфїд заліза II (FeS) чистотою 99,99%.

Для експерименту було використано вакуумна індукційна піч. Зразки рідкої сталі відбирали після розкислення (через 2 хвилини після додавання алюмінію) та різний час (через 2 хвилини та 4 хвилини) після обробки кальцієм.

Дані лабораторних досліджень наведено у Таблиці 1. Усереднений склад включень, що було отримано за допомогою електронного мікроскопу являють собою суміші компонентів Al_2O_3 , CaO и CaS. Вміст магнію в цих включеннях був на рівні до 2%. У більшості випадків включення показали максимальний вміст сірки після обробки кальцієм, при цьому вміст включень зменшувався з часом. В більшості випадків включення містять максимальний вміст сірки після обробки кальцієм, при цьому її вміст зменшується з часом.

Як свідчать дані Таблиці 1, в більшості своїх випадків включення показали максимальний вміст сірки після обробки кальцієм, при цьому вміст сірки у включеннях зменшується з часом.

Далі нами були проведені промислові випробування та відібрані проби металу з сталковша та кристалзатора та досліджені металографічними методами.

Промислові зразки відбирали у різні моменти часу промислових плавок (до обробки кальцієм, одразу після обробки кальцієм та через тривалий час після обробки кальцієм). Після цього було проведено дослідження на присутність проміжних продуктів реакції.

Склад включень у промислових зразках складався з глинозема, до обробки кальцієм, іноді виявлялись кальцій, сірка. Після обробки кальцієм спостерігалось утворення проміжних продуктів таких як CaS у присутності немодифікованого глинозема, рис. 1. Рідкі алюмінати кальцію (модифіковані включення) спостерігалися у зразках після обробки кальцієм, рис. 2.

Середній склад включень і загальна площа виявлених включень у зразках, відібраних у різні періоди після обробки кальцієм

Хімічний склад зразка, ppm	Зразки, що досліджувались	Співвідношення складу включень			Частка площі включень, ppm
		Al, %	S, %	Ca, %	
Al – 1000 Ca – 29 O – 30 A S – 7	0,5 хв., після Ca 2 хв., після Ca 4 хв., після Ca	36 12 32	1 14 8	63 74 60	40 50 160
Al – 700 Ca – 21 B O – 43 S – 40	0,5 хв., після Ca 2 хв., після Ca	48 52	20 18	32 30	20 120
Al – 700 Ca – 20 B O – 45 S – 45	до введення Ca 2 хв., після Ca 4 хв., після Ca	100 57 68	0 17 7	0 26 25	40 75 125
Al – 700 Ca – 21 O – 43 Г S – 40	до Ca 2 хв., після Ca 4 хв., після Ca	100 63 75	0 14 4	0 23 21	160 90 220

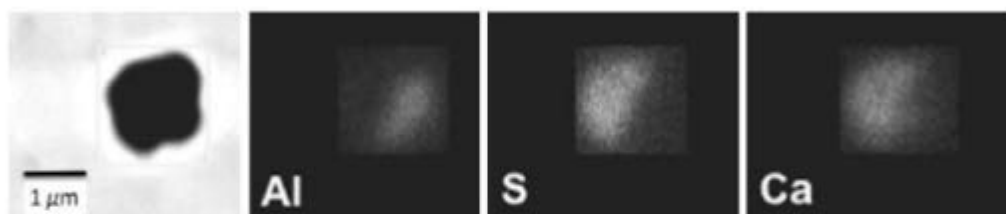


Рис. 1. Перехідний стан у промисловому зразку: CaS у контакті з глиноземом (зразок, який було взято одразу після обробки кальцієм – ковшова проба)

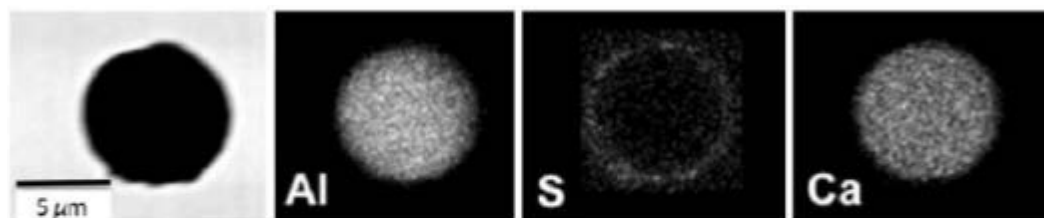


Рис. 2. Повністю модифікований алюмінат кальцію (рідкий за температури лиття) у промисловому зразку. Зразок було відібрано через тривалий час після обробки кальцієм

Розподіл складу включень аналогічно показує зсув у складі включень від комбінації з немодифікованим глиноземом у ковші одразу після обробки кальцієм до гарно модифікованих алюмінатів кальцію, які містять менше сірки.

Отже результати наших досліджень вказують на істотну різницю в механізмі модифікації сталей з низьким та високим вмістом сірки. Базуючись на результатах наших досліджень, цю різницю можна визначити наступним чином:

1. В сталях з низьким вмістом сірки основним продуктом реакції кальцію, після його введення

у розплав є CaO, тоді як основним продуктом є CaS у сталях з високим вмістом сірки; в цілому, CaO не спостерігається як продукт реакції в сталях з високим вмістом сірки.

2. В зразках, які було відібрано з сталей з високим вмістом сірки одразу після введення кальцію, CaS практично весь був зв'язаний з включеннями оксиду алюмінію, що дає змогу стверджувати, що поверхня поділу фаз оксид алюмінію – розплав сталі є місцем утворення нової фази CaS.

3. Частинок CaO, що утворюються в сталі з низьким вмістом сірки, не утворюються на

включеннях оксиду алюмінію, оскільки частинки, що були знайдені під мікроскопом, не пов'язані з глиноземом.

4. Зміни з часом в складі включень сталей з більш високим вмістом сірки відповідають реакції CaS з глиноземом з утворенням алюмінатів кальцію.

5. Для сталей з низьким вмістом сірки модифікація може відбуватися шляхом прямої реакції між CaO та Al_2O_3 , що свідчить, що реакція обмежена міжфазною реакцією між глиноземом та рідким алюмінатом кальцію. Швидкість, з якою витрачається глинозем, становить наближено 20 ммоль/с.

Висновки і пропозиції. В результаті проведеної роботи було встановлено механізм модифікації включень глинозему шляхом вивчення еволюції включень після обробки кальцієм для плавки з різним вмістом сірки.

Плавки, які містять 40 ppm сірки та більше, показали утворення перехідного CaS, що витрачається з часом, що викликає модифікацію включень глинозема. Підвищений вміст сірки у діапазоні 40–100 ppm чинить невеликий вплив на модифікацію глинозема.

Промислові випробування показали подібні результати. У лабораторних плавках з низьким вмістом сірки (7 ppm) утворюються невеликі включення CaO після обробки кальцієм, за яким утворюються перехідні фази, що реагують з глиноземом.

Наші дослідження показали, що процес модифікації спостерігається краще при невеликому вмісті сірки.

Наступним етапом наших досліджень буде встановлення оптимальної концентрації сірки для модифікації включень глинозема.

Список літератури:

1. Xi Z., Li C., Wang L. A kinetic model for the modification of Al_2O_3 inclusions during calcium treatment in high-carbon hard wire steel. *Materials*. 2021. Vol. 14(5), Pp. 2–16.
2. Li X.D., Deng S., Yang Y.B. Production practice of plasticity control of inclusions in CaO– Al_2O_3 – SiO_2 system of SWRH82B hard wire steel. *Metall.China*. 2018. Vol. 28, Pp. 61–66.
3. Tanaka Y., Pahlevani F., Kitamura S.-Y., Privat K., Sahajwalla V., Behaviour of Sulphide and Non-alumina-Based Oxide Inclusions in Ca-Treated High-Carbon Steel. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2020. Vol 51, Pp. 1384–1394.
4. Handoko W., Anurag A., Pahlevani F. Effect of selective-precipitations process on the corrosion resistance and hardness of dual-phase high-carbon steel. *Scientific reports*. 2019. Vol. 9, Pp. 1–16.
5. Wang G.D., Lv Y.W., Research on inclusion control and rolling process optimization of 82B hard wire steel. *Metall. China*. 2012. Vol. 22. Pp. 15–17.
6. Jiang Z., Tieu A., Zhang X., Lu C., Sun W. Finite element simulation of cold rolling of thin strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 140. Pp. 542–547.
7. Abraham S., Bodnar R., Raines J. Inclusion engineering and metallurgy of calcium treatment. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2018. Vol. 1, Pp.1243–1257.
8. Verma N., Pistorius P.C., Fruehan R.J., Potter M., Lind M., Story S. Transient Inclusion Evolution During Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel: Part I. Background, Experimental Techniques and Analysis Methods. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2011. Vol. 42. Pp. 711–719.
9. Yang G.W., Wang X.H., Huang F.X. Influence of Calcium Addition on Inclusions in LCAK Steel with Ultralow Sulfur Content. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2015. Vol. 46, Pp. 145–154.
10. Zhang L., Liu Y., Zhang Y. Transient Evolution of Nonmetallic Inclusions During Calcium Treatment of Molten Steel. *Metallurgical and Materials Transaction B*. 2018. Vol. 49, Pp. 1–19.
11. Sa'nchez G., Hidalgo C., Donoso P. Kinetic studies of calcium-Induced calcium release in cardiac sarcoplasmic reticulum vesicles. *Biophysical Journal*. 2003. Vol. 84. Pp. 2319–2330.

Yefimova V.G., Yusina G.L., Smirnov Yu.O., Pilipenko T.M. ESTABLISHMENT OF THE CHEMICAL MECHANISM OF MODIFICATION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN MOLTEN STEEL USING ANALYTICAL RESEARCH METHODS

This study shows that steels that have been deoxidized with aluminum and contain dissolved sulfur in their composition form solid calcium sulfide during calcium treatment, while CaO will be present in the form of calcium aluminates, with a corresponding change in composition depending on the temperature.

It was found that for each stage of the reactions of calcium aluminate conversion, the equilibrium concentrations of the reaction products will have a constant value provided that the activity coefficients of sulfur and aluminum are constant, respectively.

The study shows a change in the equilibrium reaction products as a result of the course of the chemical process and it was established that at the last stages of the process the activity of CaO increases and the activity of Al_2O_3 decreases.

In the course of the research, a kinetic model of the course of the heterogeneous process of modifying the steel melt with calcium was established.

In our studies, it was established that the mechanism of calcium dissolution in liquid steel goes through the formation of an intermediate compound. The optimal calcium concentration within 1 ppm was determined, which will be an inhibitor of the process of CaS- Al_2O_3 formation.

The work shows that to confirm the analytical analysis and verify the limiting stage of the process, namely the CaS- Al_2O_3 reaction, due to dissolved Ca as an intermediate compound, it is necessary to calculate the rate of transformation of inclusions.

It is shown that the concentrations of dissolved aluminum and sulfur, which are in equilibrium with the inclusion, are very small, and the total time required for the modification of inclusions, many times exceeded the equilibrium concentrations. To take into account these conditions, we created a kinetic model for estimating time, which allowed us to determine the rate-limiting stage of the overall process of modifying inclusions.

It was found that an increased sulfur content in the range of 40–100 ppm has a small effect on the modification of alumina.

Industrial tests have shown that steel melts with a low sulfur content (7 ppm) contribute to the formation of transitional phases that modify solid alumina inclusions. small CaO inclusions are formed after treatment with calcium, after which transitional phases are formed that react with alumina.

It was found that the best results in the modification of solid alumina inclusions are observed with a small sulfur content.

Key words: *modification, non-metallic inclusions, thermodynamic calculations, heterogeneous process, equilibrium state, diffusion.*

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 667.6, 665.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/29>

Головенко В.О.

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Приходько Д.М.

ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»
Українського державного університету науки і технологій

Коваль Д.С.

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Ясногор М.В.

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Андріянова М.В.

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАКОФАРБОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ЗНИЖЕНИМ ВМІСТОМ ЛЕТКИХ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК

Розробка лакофарбових матеріалів зі зниженим вмістом летких органічних сполук – актуальна задача сьогодення. Традиційні лакофарбові матеріали та покриття призводять до значного забруднення навколишнього середовища через високі викиди летких органічних сполук (ЛОС) і ресурсомісткі виробничі процеси. В той же час екологічно чисті альтернативи, включаючи лакофарбові матеріали та покриття з низьким вмістом ЛОС, нульовим вмістом ЛОС і покриття на біологічній основі, пропонують багатообіцяючі рішення шляхом зниження рівня ЛОС і використання відновлюваних ресурсів. Помітні досягнення, такі як розробки лакофарбових матеріалів та покриття на водній основі, використання алкідних смол на основі різних рослинних олій та технології самовідновлення, підкреслюють зрушення галузі до екологічніших варіантів. Незважаючи на переваги, залишаються проблеми, такі як досягнення порівнянної продуктивності з традиційними матеріалами та покриттями, а також вищі витрати на виробництво. Нормативно-правові рамки та зростання споживчого попиту на екологічно чисті продукти спонукають галузь до цих інноваційних рішень. Очікується, що майбутні дослідження будуть зосереджені на підвищенні ефективності покриттів з низьким вмістом ЛОС, покращенні можливості переробки та розробці багатофункціональних покриттів.

У статті представлені нові підходи до рецептури лакофарбового матеріалу зі зниженим вмістом летких органічних сполук, а саме емалі для внутрішньої/зовнішньої обробки різних поверхонь та для покриття металу. З метою відповідності новим обмеженням ринку, пов'язаним зі зменшенням викидів ЛОС, запропоновано заміна традиційного алкідного лаку ПФ-060 на більш сучасний модифікований лак Synthalat, а також заміна розчинника та сикативу.

Досліджено фізико-хімічні характеристики одержаних лакофарбових матеріалів зі зниженим вмістом летких органічних сполук. Встановлено, що більшість показників знаходяться у межах допустимої норми, що дозволяє запропонувати одержаний лакофарбовий матеріал для внутрішньої і зовнішньої обробки та фарб для покриття металевих конструкцій.

Ключові слова: лакофарбовий матеріал, фізико-хімічні характеристики, леткі органічні сполуки, лак, лакофарбове покриття.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день на споживчих ринках України представлено досить широкий асортимент лакофарбових матеріалів (ЛФМ) [1]. Але високі вимоги до безпеки ЛФМ та зростаючі вимоги до охорони навколишнього середовища не лише обмежують вміст розчинників та інших токсичних летких органічних сполук (ЛОС) в рецептурах матеріалів, але й стимулюють розробку та удосконалення ЛФМ, що не шкодять навколишньому середовищу та забезпечують довготривалий захист металевих та інших конструкцій [1-4]. Тому аналіз рецептурних складників, визначення фізико-хімічних показників готових ЛФМ є важливим етапом при загальному оцінюванні їх якості та безпечності використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки зріс інтерес лакофарбової промисловості до нових перспектив, спрямованих на сталий розвиток, що спонукає виробників ЛФМ використовувати альтернативні варіанти, які допомагають знизити вплив викидів летких органічних сполук. Цей вплив особливо негативний, оскільки має екологічні наслідки, пов'язані із забрудненням атмосфери, та соціальні наслідки через їх шкідливий вплив на здоров'я людини [1]. В останній час були запропоновані напрямки пошуку, в ході яких було виявлено три ключові фактори [2]:

- зелена хімія, заснована на виробництві ЛФМ на основі використання та/або синтезу сировини з відновлюваних матеріалів;

- впровадження стратегій чистішого виробництва, які передбачають зміну технології виготовлення та нанесення ЛФМ, наприклад, на водну основу, порошкоподібну або зі зміною вмісту твердих речовин;

- правила та стандарти, яких необхідно дотримуватись щодо викидів ЛОС та які залежать від типу промисловості та країни, де вони виготовляються та застосовуються.

Властивості традиційних ЛФМ, таких як фарби, лаки та ін., безпосередньо залежать від рецептурного складу, а саме розчинників, смол і пігментів та ін.. Деякими типовими прикладами є алкідні фарби, поліуретанові покриття та епоксидні смоли [4]. Ці матеріали відомі своєю міцністю, захисними властивостями та візуальною привабливістю. Однак вони створюють значні екологічні перешкоди. Важливим питанням є виділення ЛОС під час нанесення та затвердіння продукту. Летючі органічні сполуки відіграють певну роль у забрудненні повітря, утворюючи приземний озон і смог, створюючи ризики для здоров'я людини та навколишнього середовища.

Крім того, виробництво та утилізація звичайних покриттів часто містять небезпечні речовини, що призводить до забруднення ґрунту та води [5].

Зростаюча потреба в екологічно чистих альтернативах зумовлена екологічним впливом звичайних покриттів. Екологічно чисті покриття спрямовані на зниження впливу на навколишнє середовище за рахунок зменшення викидів летких органічних сполук, використання відновлюваних ресурсів і покращеної здатності до біологічного розкладання. Попит на ці екологічні варіанти підживлюється зростаючими нормативними вимогами та свідомістю споживачів щодо екологічних проблем. Наприклад, покриття на біологічній основі, виготовлені з натуральних олій і смол, стають все більш популярними, оскільки вони менше впливають на навколишнє середовище та зменшують залежність від викопного палива. Ці речовини є можливим варіантом замість традиційних покриттів, забезпечуючи порівняльні характеристики з акцентом на екологічність [6].

Покриття з низьким і нульовим вмістом ЛОС – це нові варіанти, спрямовані на зменшення викиду летючих органічних сполук у повітря. Покриття з низьким вмістом ЛОС мають нижчу концентрацію ЛОС порівняно зі звичайними ЛФМ, тоді як покриття з нульовим вмістом ЛОС виготовляються без будь-яких вимірних ЛОС відповідно до нормативних вказівок. Для транспортування цих покриттів використовується вода або інші безпечні розчинники, що зменшує викиди шкідливих речовин під час нанесення та затвердіння. Переваги для навколишнього середовища від використання покриттів з низьким і нульовим вмістом ЛОС значні. Зменшуючи викиди ЛОС, ці покриття допомагають покращити якість повітря та мінімізують утворення приземного озону, який може призвести до респіраторних проблем та інших проблем зі здоров'ям. Крім того, ці покриття часто мають менший вплив на якість повітря в приміщенні, що робить їх більш безпечним варіантом для житлових і комерційних приміщень [7].

Тому для зниження летких органічних сполук, енергоємності процесу покриття, підвищення якості лакофарбових покриттів (ЛФП) актуальною є розробка вітчизняних ЛФМ зі зниженим вмістом ЛОС.

Постановка завдання. Метою роботи є наукове обґрунтування, оптимізація складу та вивчення властивостей лакофарбових матеріалів зі зниженим вмістом летких органічних сполук.

Виклад основного матеріалу. Класичні лакофарбові матеріали для внутрішньої і зовнішньої

обробки та для покриття металевих конструкцій являють собою складні хімічні композиції, що містять плівкоутворювачі, наповнювачі, диспергатори, змочувачі, сикативи, прискорювачі затвердіння, розріджувачі, розчинники тощо. Такі ЛФМ можуть бути призначені для фарбування радіаторів опалення, а також для будь-яких дерев'яних і заґрунтованих металевих поверхонь, що зазнають постійну температурне навантаження [1]. Нанесення ЛФМ і подальша експлуатація покриття обумовлює контакт людини із вищезазначеними компонентами. Більш того, деякі хімічні сполуки можуть мігрувати в навколишнє середовище й негативно впливати на екологію та здоров'я людей [5].

В даній роботі для оптимізації складу і технологічного процесу виробництва алкідних емалей шляхом зниження кількості ЛОС у технології отримання ЛФМ передбачалася заміна деяких компонентів у рецептурі виготовлення алкідної емалі для радіаторів опалення. Було запропоновано замінити деякі компоненти:

- класичний лак ПФ-060 замінити на модифікований лак Synthalat;
- розчинник уайт-спірит замінити на деароматизований розчинник Ehxsol;
- для покращення часу висихання ЛФМ традиційний сикатив замінити на модифікований безсвинцевий сикатив, що має у своєму складі солі марганцю та барію.

Визначення фізико-хімічних показників лакофарбових матеріалів проведено у відповідності до стандартизованих методик. Характеристика основних рецептурних складників модифікованого зразка ЛФМ наведена нижче.

Модифікований лак Synthalat представляє собою алкідний лак з високим сухим залишком, що використовується для швидковисихаючих промислових покриттів з гарним збереження блиску. Вибір лаку Synthalat обумовлений його 70%-вою жирністю. Відомо, що за кількістю залишків кислот алкідні смоли підрозділяють на надхуді (<35%), худі (35–45%), середні (46–55%), жирні (56–70%) і дуже жирні (>70%). Жирні алкідні смоли отримують на основі висихаючих олій, тобто таких, які містять в карбонільному залишку 3 супряжених зв'язки – висихаючі олії (тунгова, льняна і гідратована касторова). Напіввисихаючі олії утворюють плівки при температурі 60–70°C (соєва, соняшникова). Невисихаючі олії не містять подвійних зв'язків чи містять один (кокосова, сира касторова). Вони не тверднуть навіть при температурі 120°C. При виробництві алкідних смол, модифікованих олією, використовують принцип – чим вище ненасиче-

ність (більша функціональність) вихідних олій, тим швидше відбувається утворення смоли і тим вище повинна бути жирність випускаємих алкідних смол. Таким чином, лак Synthalat підходить для радіаторних емалей з низькою тенденцією до пожовтіння. Це сприятиме отриманню швидковисихаючих емалей з високою еластичністю, високим блиском і відмінною атмосферостійкістю.

Деароматизований розчинник Ehxsol представляє собою деароматизований уайт-спірит, містить менше 0,0001% бензолу і менше 0,0005% сірки. Завдяки такому складу цей розчинник має слабкий запах і низьку токсичність. Застосовується в лакофарбних матеріалах для зовнішньої і внутрішньої обробки, а також для знежирення поверхні перед забарвленням і чищення робочого інструменту (кистей, валиків, фарборозпилювача). Також застосовується для розбавлення лакофарбових матеріалів (фарб, емалей, лаків, ґрунтовок) на основі алкідних і поліакрилових смол.

Модифікований безсвинцевий сикатив представляє собою суміш солей марганцю та барію. Сикатив марганцю має темний колір і з часом не викликає зміну кольору лакофарбового покриття, тому він використовується у рецептурах, де зміна кольору на дуже важлива. Присутність марганцю забезпечує формування лакофарбового покриття при більш низькій температурі, ніж у випадку з сикативом кобальту. Лакофарбові покриття, що містять марганець менш піддаються зморщуванню в умовах високої вологості. Сикатив на основі барію сприяє внутрішньому висиханню та покращує блиск захисних лакофарбових покриттів. Крім того, сикатив на основі барію діє як гарний змочувач для пігментів та наповнювачів та сприяє процесу їх диспергування, перешкоджаючи адсорбції первинних сикативів на поверхні часток твердої фази. Також сикатив на основі барію збільшує стабільність лакофарбових матеріалів при їх зберіганні.

Таким чином, до складу досліджуваного лакофарбового матеріалу входять дієві та достатньо безпечні компоненти. Аналіз результатів експериментальних досліджень по визначенню основних фізико-хімічних показників якості лакофарбових матеріалів до і після зміни рецептури показав, що більшість показників знаходяться у межах допустимої норми. Результати досліджень наведені у таблиці.

У якості зразка 1 було обрано класичну емаль для радіаторів опалення, зразок 2 – емаль зі зміненою рецептурою. Отримані дані свідчать, що ЛФМ цілком відповідають проектним вимогам і основному призначенню.

Фізико-хімічні та механічні показники досліджуваних лакофарбових матеріалів

Найменування показника	Норма	Зразок 1	Зразок 2
Умовна в'язкість при температурі (20±5)°С, по віскозиметру ВЗ-246 (ВЗ-4), сек	80-120	147	120
Масова частка нелетких речовин, %	55-95	55	55
Ступінь перетиру, мкм, не більше	25	25	25
Укривність висушеної плівки, г/м ² , не більше	100	82,9	93,3
Час висихання до ступеня 3 при температурі (20±5)°С, год, не більше	24	24	24
Еластичність плівки при вигині, мм, не більше	1	1	1
Адгезія плівки, бали, не більше	1	1	1
Міцність плівки при ударі по приладу У-1, см, не менше	45	45	45
Твердість плівки по маятниковому приладу, ум.од., не менше	0,25	0,25	0,25
Стойкість покриття при температурі (20±5)°С до статичної дії води, не менше	2	2	2
Стойкість покриття до статичної дії 0,5 %-вого розчину миючого засобу, хв., не менше	15	15	15

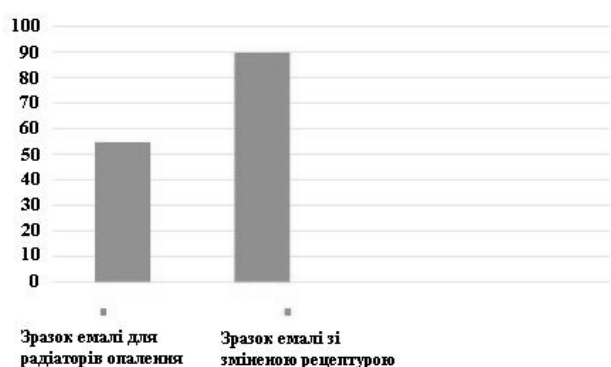


Рис. 1. Зміна коефіцієнту контрастності досліджуваних лакофарбових матеріалів

Для аналізу декоративних властивостей досліджуваних лакофарбових матеріалів було визначено коефіцієнт контрастності (рис. 1).

Як видно з рисунку зразок емалі зі зміненою рецептурою має більше значення коефіцієнту контрастності, що свідчить про кращу укривність покриття, що також підтверджується даними таблиці.

Висновки. Результати досліджень показали, що лакофарбовий матеріал зі зміненою рецепту-

рою має фізико-хімічні та механічні показники на рівні з контрольною при меншій кількості ЛОС у складі. Одержані результати дозволяють рекомендувати використання зміненої рецептури для отримання лакофарбових матеріалів з меншим вмістом ЛОС. Особливо зважаючи на те, що зростання обсягів виробництва та споживання ЛФМ потребує вдосконалення технологій їх отримання з метою зменшення екологічного впливу.

Застосування цих розробок сприятиме просуванню індустрії лакофарбових матеріалів до підвищення екологічної відповідальності та ефективності. Промисловість може зменшити шкоду навколишньому середовищу та підтримати стале майбутнє, використовуючи екологічно чисті матеріали та передові технології. Удосконалення покриттів покращують продуктивність, а також сприяють відповідальному використанню ресурсів і мінімізації відходів. Із суворішими правилами та зростаючим інтересом споживачів до екологічно чистих продуктів постійні інвестиції в дослідження та розробки матимуть вирішальне значення для сприяння відповідальним інноваціям і досягнення цілей сталого розвитку в довгостроковій перспективі.

Список літератури:

1. Дудла І. Гармонізація вимог до безпечності лакофарбових матеріалів в Україні та ЄС. *Товари і ринки: проблеми безпечності товарів*. 2016, №1, с. 222-235.
2. Jiménez-López A. M., Hincapié G. A. Identification of factors affecting the reduction of VOC emissions in the paint industry: Systematic literature review. *Progress in Organic Coatings*. 2022, №170, p.1-11.
3. Суворова Ю. О., Черваков О. В., Андріянова М. В., Бортницький В. І., Комлякова О. М. Плівкоутворення бутанолізованих дифенілолпропан-формальдегідних олігомерів, модифікованих жирами рослинного та тваринного походження. *Питання хімії та хімічної технології*. 2016, № 4 (108), с. 67-72.
4. Pratyush Malik, Durgapada Sarkhel. Advancements in bio-based materials and low-voc formulations: paving the way for sustainable innovation in the coatings industry. *Journal of coating technology and innovation*. 2024, №. 2 (2), p. 34-38.
5. Schieweck A., Bock M.-C. Emissions from low-VOC and zero-VOC paints – Valuable alternatives to conventional formulations also for use in sensitive environments? *Building and Environment*. 2014, № 85, p.243-252.

6. Jouyandeh M, Seidi F, Habibzadeh S, Hasanin MS, Wiśniewska P, Rabiee N. An overview of green and sustainable polymeric coatings. *Surface Innovation*. 2023, №12(5-6), p.268-281.

7. Liu Y, Zeng C, Wang M, Shao X, Yao Y, Wang G. Characteristics and environmental and health impacts of volatile organic compounds in furniture manufacturing with different coating types in the Pearl River Delta. *Journal of Clean Production*. 2023, №397, p.136-189.

Holovenko V.O., Prykhodko D.M., Koval D.S., Yasnohor M.V., Andriianova M.V.

PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF PAINT MATERIALS WITH REDUCED CONTENT OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS

The development of paint and varnish materials with a reduced content of volatile organic compounds is an urgent task today. Traditional paints and coatings lead to significant environmental pollution due to high emissions of volatile organic compounds (VOCs) and resource-intensive production processes. At the same time, environmentally friendly alternatives, including low-VOC, zero-VOC and bio-based paints and coatings, offer promising solutions by reducing VOC levels and using renewable resources. Notable advances such as the development of water-based paints and coatings, the use of alkyd resins based on various vegetable oils, and self-healing technology highlight the industry's shift toward greener options. Despite the advantages, challenges remain, such as achieving comparable performance with traditional materials and coatings, as well as higher manufacturing costs. Regulatory frameworks and growing consumer demand for environmentally friendly products are driving the industry toward these innovative solutions. Future research is expected to focus on improving the performance of low-VOC coatings, improving recyclability, and developing multi-functional coatings.

The article presents new approaches to the formulation of paint and varnish material with a reduced content of volatile organic compounds, namely enamels for internal/external treatment of various surfaces and for metal coating. In order to comply with the new market restrictions related to the reduction of VOC emissions, it is proposed to replace the traditional PF-060 alkyd varnish with a more modern modified Synthalat varnish, as well as to replace the solvent and desiccant.

The physicochemical characteristics of the obtained paint and varnish materials with a reduced content of volatile organic compounds were studied. It was established that most of the indicators are within the permissible norm, which allows us to offer the resulting paint and varnish material for interior and exterior finishing and paints for covering metal structures.

Key words: *physical and chemical characteristics, paint material, volatile organic compounds, varnish, paint coating.*

Ковальов О.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Літинська М.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ХРОМОГЕННІ СПОЛУКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ІОНІВ НІКЕЛЮ ТА ПЛЮМБУМУ У ЗРАЗКАХ ВОДИ ТА ВИТЯЖКАХ ҐРУНТІВ

В результаті проведення воєнних дій, а також в результаті діяльності промислових об'єктів на території України відбувається значне забруднення ґрунтів та поверхневих вод у всіх регіонах країни, різноманітними поллютантами, серед яких можна виділити важкі метали, що в свою чергу підвищило ризик споживання населенням цих забруднювачів у складі питної води та продуктів харчування, що в свою чергу призводить до збільшення ризиків виникнення злоякісних ракових клітин, дерматиту, погіршення роботи внутрішніх органів. Це робить вкрай нагальною потребу у частому та регулярному моніторингу якості водних та земельних ресурсів України, особливо тих, що використовуються для підготовки питної води, сільського господарства та аквакультури. Нікель та плумбум відносяться до важких металів, які у значних кількостях присутні у сплавах, що використовуються у військовій техніці, озброєнні та боєприпасах. Також нікель та плумбум потрапляють до поверхневих вод та ґрунтів разом з стоками промислових об'єктів. Стаття присвячена розкриттю найбільш розповсюджених методів визначення вмісту іонів нікелю та плумбуму у зразках води та водних витяжках ґрунтів. У статті описуються такі методи як атомна адсорбційна спектрофотометрія, мас-спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою, рентгенівська флуоресцентна спектрометрія, вольтамперометрія, іонообмінна хроматографія, фотометрування. Також у статті характеризувано хромогенні сполуки, використання яких доцільне для майбутньої розробки індикаторних систем для визначення вмісту іонів нікелю та плумбуму у польових умовах. Досліджена можливість використання для виготовлення індикаторних систем таких сполук як 1-(2-Піриділазо)-2-нафтол, 4-(2-Піриділазо)резорцинол, дифенілгуанідин, β-дикетони, ксантогенат натрію, діетилдітіокарбамат натрію, дитизон, йодид калію, тіоціанат амонію.

Ключові слова: індикаторні системи, методи аналізу, нікель, плумбум, фотометрія.

Постановка проблеми. Внаслідок воєнних дій території України зазнали значного забруднення поллютантами різних типів, включаючи іони важких металів, поліциклічні вуглеводні, різномані продукти розкладу біомаси тощо [1]. Згідно літературних даних [2, 3], в результаті тривалих військових дій ґрунти в значній мірі забруднюються важкими металами, зокрема спостерігаються підвищені концентрації іонів нікелю та плумбуму, що відносяться до важких металів, які у значних кількостях присутні у сплавах, що використовуються у військовій техніці, озброєнні та боєприпасах. У ґрунти сільськогосподарського призначення іони важких металів потрапляють в результаті взаємодії металічних частин (уламків техніки та боєприпасів, гільз тощо) з водою, атмосферним киснем, компонентами ґрунту та ґрунтовими мікроорганізмами (рис. 1).

Також ґрунти можуть забруднюватись в результаті осідання металвмісного пилу, який виникає за тривалого тертя металічних поверхонь техніки, а також в результаті зрошування водою, забрудненою сполуками важких металів. Забруднення земель та водних ресурсів України важкими підвищило ризик споживання населенням цих забруднювачів у складі питної води та продуктів харчування. Це робить вкрай нагальною потребу у частому та регулярному моніторингу якості водних та земельних ресурсів України, особливо тих, що використовуються для підготовки питної води, сільського господарства та аквакультури. А, отже, розробка простих, дешевих та швидкодіючих індикаторних систем на основі хромогенних сполук дозволить значно спростити процес моніторингу шляхом аналізу в польових умовах.

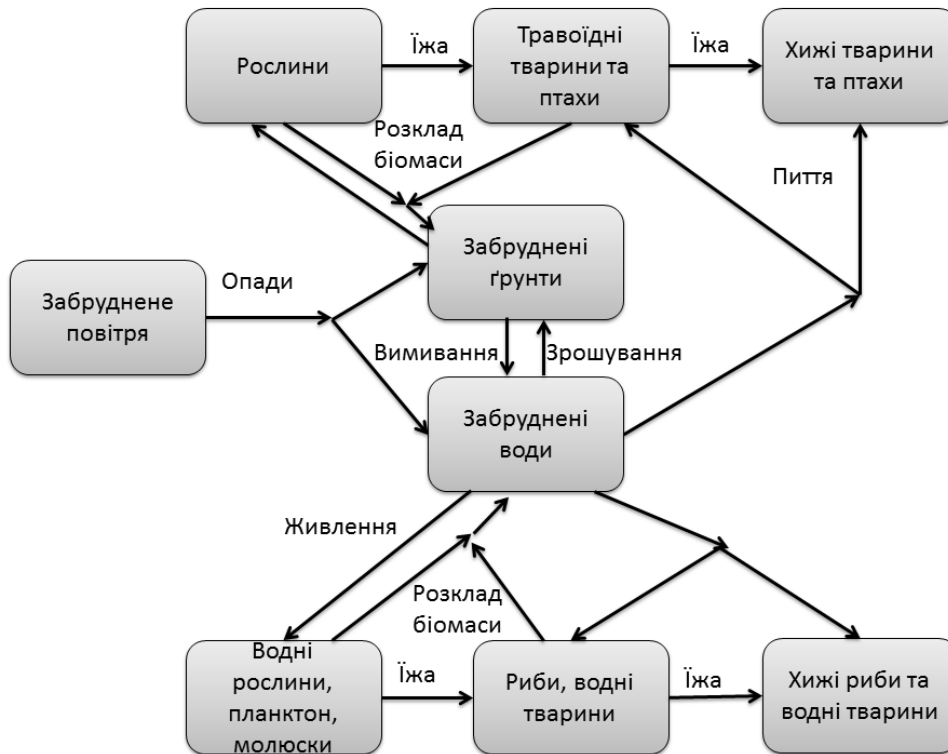


Рис. 1. Схема міграції важких металів у екосистемі

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Атомно-адсорбційна спектрометрія (ААС) є точним і широко застосовуваним методом для визначення концентрації важких металів у різних середовищах. Атомно-адсорбційна спектрометрія працює за принципом поглинання світла атомами вільного елемента в газовій фазі. Коли атоми певного елемента нагріваються в полум'ї або графітовій печі, вони переходять у вільний атомний стан і здатні поглинати світло специфічної довжини хвилі. Це поглинання є пропорційним до концентрації атомів у зразку, що дозволяє визначити кількісний вміст елемента. Метод дозволяє визначити лише один елемент за один вимір, що обмежує можливості аналізу зразків з великою кількістю елементів [4].

Мас-спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS) – це один із найбільш чутливих і точних методів для визначення концентрації важких металів. Цей метод поєднує високотемпературну індуктивно-зв'язану плазму для іонізації елементів з мас-спектрометром, який розділяє іони за масою. Оскільки кожен елемент має унікальну масу, мас-спектрометр дозволяє одночасно виявити і розрізнити різні елементи, навіть при дуже низьких концентраціях [5].

Рентгенівська флуоресцентна спектрометрія (XRF) – це неруйнівний метод аналізу, який

використовується для швидкого аналізу зразків завдяки здатності визначити широкий спектр елементів у різних концентраціях, починаючи з мікрограмів на грам. Метод базується на вимірюванні флуоресцентного випромінювання, яке випускають атоми елементів під дією рентгенівських променів [6].

Вольтамперометрія – це аналітичний електрохімічний метод, який дозволяє визначити концентрацію важких металів шляхом вимірювання змін електричного струму в зразку внаслідок окисно-відновних реакцій металів. Даний метод є високочутливим і дозволяє виявляти навіть дуже низькі концентрації важких металів у складних багатокомпонентних середовищах. Кожний елемент має унікальний потенціал, при якому він окислюється або відновлюється. Це дозволяє одночасно визначити кілька металів, якщо вони мають різні пікові значення потенціалу. Висота піку або сила струму корелює з концентрацією іонів металу у зразку [7].

Іонообмінна хроматографія – це метод розділення та визначення іонів, заснований на їх розподілі між рухомою рідиною (елюентом) та нерухою фазою (іонообмінною смолою). Метод ефективний для виявлення важких металів, таких як плумбум, кадмій, нікель, мідь, цинк, арсен та інші в розчинах [8]. У процесі проходження металів через смолу, вони розділяються залежно від

сили їх взаємодії зі нею. Кожен метал виходить з колонки в певний час, що є унікальним для кожного типу іонів [8]. Для утримання позитивно заряджених іонів, таких як свинець (Pb^{2+}) та нікель (Ni^{2+}), використовуються катіонообмінні смоли.

Фотометрування – один із доступних і відносно простих методів виявлення важких металів у розчинах. Він базується на порівнянні інтенсивності світла до та після проходження досліджуваного зразку. Зміна інтенсивності кольору дозволяє визначати концентрацію речовини яка міститься в ньому, в тому числі йони металів. Метод зручний як для лабораторних, так і для польових умов [9].

Постановка завдання. Завданням дослідження є огляд та порівняння хромогенних сполук, які можуть бути використані для розробки селективних індикаторних систем, які можливо було б застосовувати у польових умовах для визначення вмісту іонів нікелю та свинцю.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу водних середовищ на вміст нікелю можуть використовуватись різноманітні органічні речовини, зокрема 1-(2-піриділазо)-2-нафтол, β -дикетон, 4-(2-піриділазо)резорцинол, натрій ксантогенат тощо [11, 12, 13, 14].

1-(2-Піриділазо)-2-нафтол (PAN) є високо-селективним реагентом для визначення нікелю завдяки його здатності створювати стійкі забарвлені комплекси з іонами Ni^{2+} . Комплекс Ni-PAN має інтенсивний червоно-фіолетовий колір, що дозволяє легко проводити спектрофотометричний аналіз. Для утворення комплексу необхідно слабе кисле середовище (рН близько 4-5), яке передбачається за допомогою додавання буферного розчину, наприклад, ацетатного. Важливо контролювати значення рН, оскільки при інших значеннях реакція може втрачати вибірковість. Після утворення комплексу розчин поміщають у спектрофотометр і вимірюють інтенсивність поглинання на довжині хвилі приблизно 560 нм [11].

4-(2-Піриділазо)резорцинол (PAR) – це ще один ефективний реагент для кількісного визначення нікелю. Він утворює жовто-червоний або червоно-оранжевий комплекс з Ni^{2+} у нейтральному середовищі. Інтенсивність забарвлення залежить від концентрації нікелю в розчині. Найкращі результати досягаються в нейтральному або слабколужному середовищі (рН близько 7-8. Комплекс має максимальне поглинання на довжині хвилі близько 510 нм, що дозволяє точно виміряти його концентрацію. PAR може утворювати комплекси з деякими іншими металами, що іноді вимагає використання маскувальних агентів [11].

Дифенілгуанідин є специфічним реагентом для визначення нікелю, після чого він утворює червоно-фіолетовий комплекс з Ni^{2+} у слабкислому середовищі. Комплекс дозволяє проводити спектрофотометричний аналіз навіть при низьких концентраціях нікелю [12]. Найкращі результати досягаються в слабкислому середовищі (рН близько 5-6), що дозволяє підтримувати стабільність комплексу. Ni^{2+} вступає в реакцію з дифенілгуанідином, утворюючи забарвлений комплекс. Спектрофотометричний аналіз аналізується за довжини хвилі близько 540 нм. Для точності методу доцільно використовувати маскувальні агенти [12].

Ще одним високоселективним реагентом для виявлення іонів нікелю являються β -дикетони. Сполуки даного типу утворюють комплекси з Ni^{2+} в умовах нейтрального або слабколужного середовища, що робить метод зручним для застосування в природних і питних водах. Спектрофотометричне вимірювання проводиться, в залежності від того який конкретно β -дикетон використано, за довжин хвилі в діапазоні 400-600 нм [13].

Ксантогенат натрію є реагентом, що утворює жовто-зелений комплекс з Ni^{2+} у лужному середовищі. Цей комплекс можна екстрагувати в органічний розчинник, що дозволяє проводити спектрофотометричний аналіз з високою чутливістю. Реакція з ксантогенатом натрію відбувається в лужному середовищі (рН понад 9), що забезпечує утворення стійкого комплексу з нікелем. Комплекс Ni^{2+} з ксантогенатом натрію екстрагують в органічний розчинник (такий як хлороформ або толуол). Спектрофотометричний аналіз проводиться на довжині хвилі близько 430 нм, де комплекс показує максимальне поглинання. Для виконання аналізу з використанням даного реагенту необхідно використовувати органічні розчинники, що може бути незручним для польових умов. Ксантогенат натрію в лужному середовищі здатен утворювати побічні продукти з іншими металами, в зв'язку з чим, при використанні даного реагенту доцільно користуватись маскувальними реагентами [14].

Діетілдітіокарбамат натрію (NaDDTC) є хелатним реагентом, який утворює інтенсивно забарвлений комплекс з Ni^{2+} . Комплекс добре розчиняється в органічних розчинниках, таких як хлороформ, що дозволяє використовувати екстракційні методи для подальшого спектрофотометричного визначення, проте може бути незручним для використання даного методу в польових умовах. Реакція комплексоутворення відбувається

в лужному середовищі, за якого NaDDTC найкраще взаємодіє з іонами нікелю. Комплекс екстрагують в органічний розчинник (наприклад, хлороформ), що забезпечує кращу роздільну здатність при спектрофотометричному аналізі. Комплекс має максимальне поглинання за довжини хвилі близько 380 нм [15].

У лужному середовищі іони Ni^{2+} реагують з диметилгліоксимом, утворюючи червоно-рожевий комплекс. Цей комплекс є розчинним в органічних розчинниках і має характерне забарвлення червоного кольору, що дозволяє селективне спектрофотометричне визначення йонів нікелю. Завдяки особливій взаємодії з нікелем диметилгліоксим унікає реакцій з іншими металами. До досліджуваного розчину додають аміак або інший реагент для створення необхідного рН (зазвичай близько 9-10). Після чого, до розчину додають диметилгліоксим у розчинній формі, який реагує з Ni^{2+} і утворює з утворенням забарвленого комплексу. Після проходження реакції комплексоутворення, випробовуваний розчин поміщають у спектрофотометр і вимірюють його поглинання за довжини хвилі, що відповідає максимуму поглинання комплексу $\text{Ni(II)}\text{-ДМГ}$ (приблизно 470 нм). Хоча метод є селективним, деякі йони металів все ж можуть вплинути на результати. Для отримання точних результатів доцільно використовувати додаткові реагенти або маскуючі агенти [16].

Для визначення вмісту плумбуму у водних розчинах можуть використовуватись різноманітні органічні та неорганічні речовини, зокрема дитизон, калій йодид, амоній тіоціанат, 4-(2-Піридилазо)резорцинол, крезоловий червоний, сульфарсазен тощо [17].

Дитизон є органічним реагентом, що утворює забарвлений комплекс із іонами свинцю. Цей метод є високоселективним для свинцю і дозволяє проводити як кількісний, так і якісний аналіз. Дитизон утворює із свинцем комплекс зеленого кольору, який легко екстрагується в органічний розчинник, такий як хлороформ. Процес проходить в нейтральному або слабкокислому середовищі. Комплекс Pb -дитизон екстрагують органічним розчинником. Спектрофотометричний аналіз виконується за довжини хвилі близько 510 нм [17].

Іони плумбуму дають жовтий осад при реакції із йодидом калію, що є якісною реакцією. Осад PbI_2 також можна використовувати для кількісного аналізу, вимірюючи спектр поглинання розчину. Реакція відбувається в слабкокислому середовищі. Осад PbI_2 фільтрують або екстрагують для подальшого аналізу. Інтенсивність жовтого осаду може бути виміряна спектрофотометрично за

довжині хвилі близько 420 нм. Присутність інших металів може вплинути на точність, тому для отримання точних результатів доцільно використовувати додаткові маскуючі агенти [9].

Іони плумбуму утворюють з тіоціанатом амонію червоний комплекс, який може бути визначеним спектрофотометрично. Цей метод ефективний для визначення низьких концентрацій плумбуму в розчинах. Реакція найкраще протікає в слабкокислому середовищі. Вимірювання виконується на довжині хвилі близько 480 нм для оцінки інтенсивності червоного забарвлення. Іони інших речовин можуть впливати на перебіг реакції, тому для підвищення селективності методу доцільно використовувати додаткові заходи для підвищення селективності [9].

4-(2-Піридилазо)резорцинол (PAR) утворює інтенсивно забарвлений комплекс із плумбумом. Цей метод підходить для спектрофотометричного визначення Pb^{2+} у природних і промислових водах. Реакція проходить у нейтральному середовищі, що зменшує ризик побічних реакцій. Плумбум утворює з PAR червоний комплекс. Спектрофотометричне вимірювання відбувається на довжині хвилі близько 520 нм [18].

Висновки. У даному дослідженні розглянуто методи визначення у водному середовищі вмісту іонів таких важких металів як нікель та плумбум. Такі методи як атомно-адсорбційна спектрометрія, мас-спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою, хроматографія, вольтамперометрія є високо селективними та дозволяють визначити навіть дуже низькі концентрації цих полутантів. Але внаслідок дуже високої вартості обладнання та значних експлуатаційних витрат ці методи не є доступними у більшості навіть великих міст України. Затрати на фотометричне визначення вмісту іонів нікелю та плумбуму є значно нижчими, а деякі методики можна адаптувати до використання в польових умовах, що може допомогти у попередній оцінці якості вод та зменшити кількість проб, що потребують транспортування до лабораторій. Для аналізу водних середовищ на вміст нікелю можуть використовуватись різноманітні хромогенні сполуки, зокрема 1-(2-піридилазо)-2-нафтол, 4-(2-піридилазо)резорцинол, натрій ксантогенат та багато інших, а для визначення вмісту іонів плумбуму – дитизон, калій йодид, амоній тіоціанат, 4-(2-Піридилазо)резорцинол, сульфарсазен тощо. Але значним недоліком більшості відомих фотометричних методик є можливість хибно позитивних результатів аналізу внаслідок недостатньо високої селек-

тивності. Тому більшість фотометричних методик потребують ретельного дотримання рН, а також застосування різноманітних маскуючих реагентів, які зв'язують катіони інших металів, що можуть вступати у схожі фотометричні реакції.

Подяка. Автори висловлюють вдячність Міністерству освіти і науки України за фінансування проєкту «Новітні селективні індикаторні системи для оцінки стану морського довкілля України» (державний реєстраційний номер 0124U001100).

Список літератури:

1. Litynska M., Pelekhata O. The influence of the war on the content of some components in the rivers of Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 1415. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1409/1/012096>
2. Khan M. The Environmental Impacts of War and Conflict. *Institute of Development Studies*, 2022. URL: <https://doi.org/10.19088/k4d.2022.060> (date of access: 15.11.2024).
3. Altahaan Z., Dobslaw D. The Impact of War on Heavy Metal Concentrations and the Seasonal Variation of Pollutants in Soils of the Conflict Zone and Adjacent Areas in Mosul City. *Environments*. 2024. Vol. 11, no. 11. P. 247.
4. Walsh A. Physical Aspects of Atomic Absorption. *Atomic Absorption Spectroscopy*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. P. 3–3–16. URL: <https://doi.org/10.1520/stp47268s> access: 03.10.2024).
5. Thomas R. Practical guide to ICP-MS: A tutorial for beginners. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2008.
6. Acquafredda P. XRF technique. *Physical Sciences Reviews*. 2019. Vol. 4, no. 8. URL: <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0171> (date of access: 10.10.2024).
7. Han H., Pan D. Voltammetric methods for speciation analysis of trace metals in natural waters. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 29. P. e00119. URL: <https://doi.org/10.1016/j.teac.2021.e00119> (date of access: 09.10.2024).
8. Wallace R. G., Rochfort K. D. Ion-Exchange Chromatography: Basic Principles and Application. *Methods in Molecular Biology*. New York, NY, 2023. P. 161–177. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3362-5_9 (date of access: 10.10.2024).
9. Deep learning in analytical chemistry / B. Debus et al. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 145. P. 116459. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116459> (date of access: 09.10.2024).
10. Wallace R. G., Rochfort K. D. Ion-Exchange Chromatography: Basic Principles and Application. *Methods in Molecular Biology*. New York, NY, 2023. P. 161–177. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3362-5_9 (date of access: 10.10.2024).
11. Ohshita K., Wada H., Nakagawa G. Some pyridylazo compounds as sensitive reagents for the spectrophotometric determination of nickel. *Analytica Chimica Acta*. 1981. Vol. 124, no. 1. P. 193–200. URL: [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(01\)83913-1](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(01)83913-1) (date of access: 25.09.2024).
12. Research into complex formation of cobalt (II) and nickel (II) with 2- hydroxy-5-nitrothiophenol and diphenylguanidine / S. G. Aliyev et al. *Chemical Problems*. 2018. Vol. 16, no. 2. P. 196–204. URL: <https://doi.org/10.32737/2221-8688-2018-2-196-204> (date of access: 20.10.2024).
13. Synthesis, spectral, and thermal characterizations of Ni(II) and Cu(II) β -diketone complexes with thenoyltrifluoroacetone ligand / Z. Chen та ін. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2007. T. 66, № 4-5. С. 1024–1029. URL: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2006.05.015> (дата звернення: 21.11.2024).
14. Tiekink E. R. T., Haiduc I. Stereochemical Aspects of Metal Xanthate Complexes: Molecular Structures and Supramolecular Self-Assembly. *ChemInform*. 2006. Vol. 37, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1002/chin.200601234> (date of access: 21.11.2024).
15. San Andres M. Spectrophotometric determination of copper(II), nickel(II) and cobalt(II) as complexes with sodium diethyldithiocarbamate in cationic micellar medium of hexadecyltrimethylammonium salts. *Talanta*. 1994. Vol. 41, no. 2. P. 179–185. URL: [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(94\)80105-3](https://doi.org/10.1016/0039-9140(94)80105-3) (date of access: 23.11.2024).
16. Gazda D. B., Fritz J. S., Porter M. D. Determination of nickel(II) as the nickel dimethylglyoxime complex using colorimetric solid phase extraction. *Analytica Chimica Acta*. 2004. Vol. 508, no. 1. P. 53–59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2003.11.044> (date of access: 24.11.2024).
17. Stereochemistry of lead(II) complexes with oxygen donor ligands / R. L. Davidovich et al. *Coordination Chemistry Reviews*. 2009. Vol. 253, no. 9-10. P. 1316–1352. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2008.09.003> (date of access: 15.10.2024).
18. Determination of lead in solution by solid phase extraction, elution, and spectrophotometric detection using 4-(2-pyridylazo)-resorcinol / I. Rahman et al. *Open Chemistry*. 2013. Vol. 11, no. 5. P. 672–678. URL: <https://doi.org/10.2478/s11532-013-0203-x> (date of access: 24.11.2024).

Kovalyov O.S., Litynska M.I. CHROMOGENEIC COMPOUNDS FOR DETERMINING THE CONTENT OF NICKEL AND LEAD IONS IN WATER SAMPLES AND SOIL EXTRACTS

As a consequence of military operations, as well as industrial activities on the Ukrainian territory, there is considerable pollution of ground and groundwater in all regions of the country with a variety of pollutants, including heavy metals, which in turn has increased the risk of consumption of these pollutants in drinking water and food, which in turn leads to an increase in the risk of malignant cancer cells, dermatitis, and deterioration of internal organs. This makes frequent and regular environmental monitoring of the quality of Ukraine's water and land resources, especially those used for drinking water, agriculture, and aquaculture, extremely important. Nickel and plumbum are among the heavy metals that are significantly present in the alloys used in military equipments, ammunition and armaments. Additionally, nickel and plumbum are released into surface waters and groundwater through industrial discharges. This article is dedicated to describing the most common methods for determining the content of nickel and plumbum ions in water samples and soil extracts. The article describes such methods as atomic adsorption spectrophotometry, inductively coupled plasma mass spectrometry, X-ray fluorescence spectrometry, voltammetry, ion-exchange chromatography, and photometry. The article also reveals chromogenic compounds, the use of which is advisable for the future development of indicator systems for determining the content of nickel and plumbum ions in the field analysis. The possibility of using such compounds as 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol, 4-(2-pyridylazo)resorcinol, diphenylguanidine, β -diketones, sodium xanthogenate, sodium diethyldithiocarbamate, dithizone, potassium iodide, and ammonium thiocyanate for the manufacturing of indicator systems is demonstrated.

Key words: indicator systems, nickel, analysis methods, lead, photometry.

Малиновський В.В.

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

Міміна Н.Б.

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій

ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ПОКРАЩУВАЧА ҐРУНТУ ШЛЯХОМ АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ

Теоретично показано, що систематичне застосування інтенсивних технологій землеробства суттєво скорочує родючий шар ґрунту, знижується біорізноманіття, поширюються ґрунтові хвороби та інші. В статті розкрито технологію промислового аеробного компостування відходів тваринництва, а саме підстилкового гною великої рогатої худоби (ВРХ). Наведено тип технологічного устаткування для формування буртів та проведення аеробного компостування в виробничих умовах на відкритому майданчику. Проаналізовано результати біохімічної складової отриманого компосту з двох типів субстратів у різному співвідношенні: гній великої рогатої худоби, підстилкова солома, додавання верхнього болотяного торфу. Розроблена блок-схема необхідних технологічних операцій для отримання покращувача ґрунту аеробним компостуванням відходів тваринництва. Визначено експериментально (за 56 діб) кількість фаз процесу аеробного компостування (сушіння, аерація, аерація з внесенням вологи) обраної сировини при постійному контролі параметрів технологічного процесу (склад, температура, вологість, рН). З'ясовано, що сформовані бурти субстратів для отримання зрілого компосту потребували різну кількість основних операцій: компост з субстрату №1 було отримано за виконанням 6 аерацій, тоді як для компосту з субстрату №2 знадобилося 8 аерацій; субстрат №2 із включенням торфу на відміну з субстратами №1 в процесі компостування потребував внесення більшої кількості вологи (4 та 3 внесення відповідно) для підтримання оптимальних умов аеробного компостування. Показано, що кожна додаткова операція в промислових обсягах суттєво впливатиме на собівартість кінцевого продукту. Встановлено, що компост отриманий із субстрату підстилкового гною з додаванням верхнього торфу майже в 8,75 разів більше за вмістом K_2O від компосту отриманого з підстилкового гною великої рогатої худоби, інші показники (масова частка органічної складової, N , P_2O_5 , K_2O) прийнятні і не мають суттєвих відмінностей. Визначені біохімічні показники одержаного компосту показують можливість його використання як покращувача мікробіоти ґрунту в залежності від потреб рослин та ґрунту що втрачає (чи втрапив) свою родючість.

Ключові слова: аеробне компостування, компост, ґрунт, компостування гною, компостування торфу, органічні відходи, переробка відходів тваринництва, органічні добрива, покращувач ґрунту, мікробіота ґрунту.

Постановка проблеми. Потреба людства постійно збільшується в їжі, що призводить до збільшення дефіциту у площах вирощування культур з необхідністю максимальної віддачі родючості ґрунтів. Щоб задовольнити сучасні виклики у технологіях обробки ґрунту аграрії рухаються в напрямку інтенсивного землеробства: застосування великої кількості гербіцидів, стимуляторів росту рослин, препаратів для їх захисту від шкідників та хвороб. В наслідок систематичного застосування інтенсивних технологій землеробства родючий шар ґрунту суттєво скорочується та має наступні зміни: зменшується водопроникність; погіршується повітряний

режим; знижується біорізноманіття, стійкість до ерозії та дефляції; зникає водо утримуюча здатність; погіршується доступність та знижується кількість поживних речовин для рослин; поширюються ґрунтові хвороби, які передаються рослинам, тваринам, людям та інше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гній – це основне органічне добриво у всіх зонах країни, яке являє собою суміш твердих і рідких виділень сільськогосподарських тварин з підстилкою і без неї. У гної містяться всі поживні речовини, необхідні рослинам, і тому його називають повним добривом. Якість гною залежить від виду тварин, складу кормів, кількості і якості підстилки, спо-

собу накопичення й умов зберігання. Залежно від способів утримання худоби розрізняють гній підстилковий (твердий), одержуваний при утриманні худоби на підстилці, і безпідстилковий (напіврідкий, рідкий). Підстилковий гній містить близько 25% сухої речовини й близько 75% води, 0,5% азоту, 0,25% фосфору, 0,6% калію й 0,35% кальцію. До його складу входять також необхідні для рослин мікроелементи, зокрема марганець, бор, мідь, цинк, молібден на ін. [1]. Як в багатьох країнах світу так і в Україні заборонено вносити в ґрунт необроблений гній. Побічні продукти тваринного походження, що належать до категорії II, повинні бути використані для виробництва органічних добрив або покращувачів ґрунту, оброблені або перероблені одним або кількома конкретними способами [2]. Внесення необробленого гною призводить до негативних наслідків, а саме: збільшення кількості патогенних мікроорганізмів (збудників захворювання рослин, людей та тварин); зростання бур'янів (збільшується застосування гербіцидів, що винищує біорозмаїття ґрунту) [3–5]; засолення ґрунтів і погіршення їх структури (щонайбільше у регіонах з недостатньою кількістю опадів) [6–7]; призводить до мінералізації органічної речовини самого ґрунту та зменшенню доступності поживних речовин для рослин [8–9]; додавання занадто великої кількості гною може призвести до вимивання нітратів, витоку поживних речовин, надмірного вегетативного росту та, для деяких добрив, до пошкодження сіллю. А використання свіжого гною там, де вирощують продовольчі культури, створює ризик зараження хвороботворними патогенами [10]; азот у гної не доступний для зростаючих рослин відразу, оскільки велика його частина може бути зв'язана в органічних формах. Органічний азот стає доступним для рослин лише після того, як ґрунтові мікроорганізми розкладають органічні сполуки, перетворюючи вивільнений N на NH_4 , що відбувається протягом кількох років [10].

У більшості країн світу на рівні законодавства прийняті рішення щодо обробки гною, основною метою яких є знезараження побічних продуктів тваринництва. Одним з методів обробки гною та інших органічних відходів тваринництва є компостування. Зараз використовують три основних методи компостування: анаеробне, аеробне, вермікультивування. Для дослідження обрано аеробне компостування підстилкового гною ВРХ, що представляє собою процес який протікає за оптимальними показниками рівня кисню, вологи та температури. Отже актуальним є одержання покращувача ґрунту багатим на гумус, що містить

найбільш стабільні органічні сполуки, біомасу мікроорганізмів і продукти хімічної взаємодії цих компонентів.

Постановка завдання. Дослідити процес аеробного компостування підстилкового гною ВРХ з додаванням верхнього торфу для одержання покращувача ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Експеримент проводили на відкритому майданчику та сировинній базі фермерського господарства України ПП «ЕВРОСЕМ», Київська область Переяслав-Хмельницький район, с. Мала Каратуль. Технічну та технологічну підтримку проведення дослідження забезпечила компанія ТОВ «О.П.Є.». В технології аеробного компостування використовувалась спеціальна техніка: самохідний аератор BACHHUS A30, який забезпечував такі функції як сушіння, змішування, подрібнення, насичення киснем, зволоження субстратів та рівномірне внесення біопрепаратів; телескопічні навантажувачі DIECI Agri Star 30.7 та Manitu MLT X735; тягач CLAAS XERION 5000 із діжкою для води на 8 тон. Аналіз змін в субстратах аеробного компостування визначали в польових умовах візуально, замірами основних показників температури робили з використанням біметалевого термометра для компосту TFA 192008; для вимірювання кислотності і вологості використовували аналізатор ґрунту ZD-05 (РН 3–8; RH: 10–80%); перевірку показників рН робили з допомогою індикаторних смужок на рН 4,0–7,5 JTP pH Indicator Strips (125.2C); аналіз хімічного складу початкового субстрату та зрілого компосту здійснювали за ДСТУ ISO 10012:2005.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є підстилковий гній – складна полідисперсна система, яка включає тверді, рідкі і газоподібні речовини. Склад гною залежить від виду тварин, складу спожитих ними кормів, кількості і якості підстилки, способу накопичення й умов зберігання. Залежно від способів утримання худоби розрізняють гній підстилковий (твердий), одержуваний при утриманні худоби на підстилці, і безпідстилковий (напіврідкий, рідкий). Підстилкова посічена солома з місця утримання худоби підприємства, верхній торф. Утримання ВРХ здійснювалось в критих корівниках від 1000 т на рік. Дослідження технології виробництва покращувача мікробіоти ґрунту шляхом аеробного компостування проводили на відкритому майданчику виробництва ПП «ЕВРОСЕМ» Переяслав-Хмельницького району, Київської області (рис. 1а). Верхній торф із часткою мінеральної речовини

(зольністю) від 35% до 50% видобували поруч із селом Ташань, Переяслав-Хмельницького району, Київської області України (рис. 1б).

Підстилковий гній вивозили на місце тимчасового зберігання відкритого компостувального майданчика. Лінійні параметри формування (рис. 3а) та вага експериментальних буртів для аеробного компостування наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Наповнення бурту сировиною	Лінійні параметри буртів субстратів			Початкова вага бурта т
	А м	В м	С м	
Субстрат № 1	3,0	1,2	40,5	58,0
Субстрат № 2	3,0	1,2	57,0	72,0

Після накопичення достатнього обсягу (більше 1000 т) сировини для субстратів сформовано два експериментальні бурти (рис. 2) з двох типів субстратів під дослідження.

Для порівняльного аналізу якості одержаного компосту (базового), як покращувача мікробіоти ґрунту сформовано субстрати з додаванням різних складників: твердий гній ВРХ, який включає в себе тверду фракцію (солома, екскременти) та рідку фракцію (сеча, вода), верховий торф, домішки (мікробіофіти). Складові субстратів закладених на аеробне компостування наведені в таблиці 2.

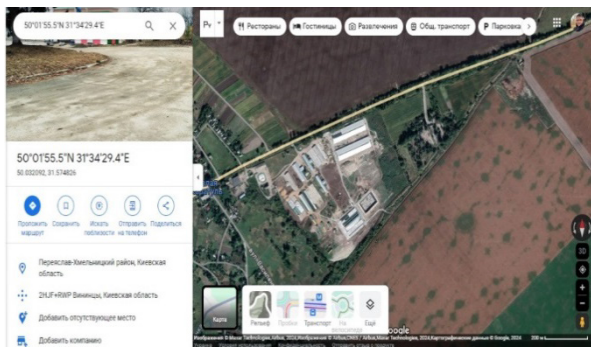
Таблиця 2

Склад сформованих субстратів на аеробне компостування

Найменування	Складові субстратів, %	
	Гній ВРХ	Верховий торф
Субстрат № 1	100	-
Субстрат № 2	90	10

Технологічний контроль процесу аеробного компостування для отримання стабільного стану компосту, здійснювали протягом 56 діб за блок-схемою (рис. 3). Необхідними умовами для запуску процесу аеробного компостування підстилкового гною ВРХ на відкритому майданчику є, температура (середня температура навколишнього середовища у місті проведення досліду не нижче +10°C), вологість у субстраті (від 45% до 65%), рН, співвідношення С:N. Для оптимального перебігу активного розвитку мікроорганізмів в процесі компостування важливе значення має вуглецево-азотний баланс (співвідношення С:N) у компостованому субстраті. Оптимальним є співвідношення від 20:1 до 30:1. Якщо азоту мало процес розкладання сповільнюється, якщо багато виникає неприємний запах.

На початку експерименту середньодобова температура повітря складала +26°C, показники рН двох типів субстратів 10:1 та 15:1, що є можливими умо-

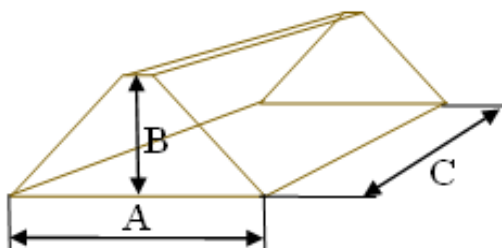


а)



б)

Рис. 1. Загальний вигляд обраної місцевості для проведення експерименту: а) майданчик для відкритого компостування; б) процес видобування верхового торфу



а)



б)

Рис. 2. Закладання експериментальних буртів: а) схема лінійних параметрів буртів; б) сформований під компостування бурт

вами для запуску процесу аеробного компостування на відкритому майданчику. Оптимальний діапазон вологості 56,9% мав субстрат № 2, а субстрат № 1 з вологістю 71,7% потребував додаткової операції з сушіння, яка виконується перемішуванням (самохідним аератором ВАСKHUS А30) щодо попередження в субстраті активізації анаеробних процесів.

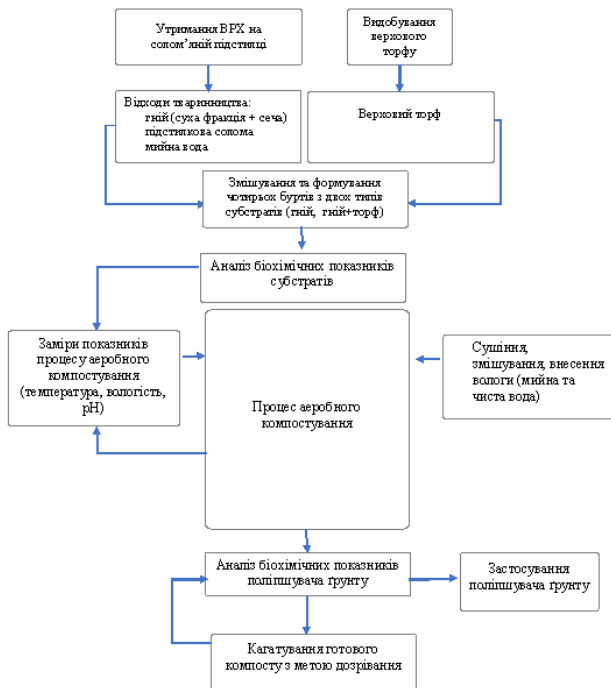


Рис. 3. Блок-схема процесу аеробного компостування

Досліджений біохімічний склад сформованих субстратів (табл. 3) за співвідношенням C:N = 10:1 (субстрат № 1), C:N = 15:1 (субстрат № 2) достатній для впровадження промислового процесу аеробного компостування на відкритому майданчику. Вміст кількості ікро та макроелементів в складі субстратів обумовлена біохімічними показниками складових кормової бази та питної води, що використовувалась в раціоні тварин.

Першим проведено активне та рівномірне збагачення киснем субстратів (аерація) самохідним аератором ВАСKHUS А30. В ході компостування аератор виконує важливі функції, а саме сушіння (внесення вологи), подрібнення, змішування сировини, рівномірний розподіл бактерій які переводять азот з активної форми в стабільну, пов'язану гумусними кислотами по всьому об'єму буртів, зменшення температури в пікових показниках термофільної фази. Закономірність проведення етапів аерацій та внесення води обумовлено показниками замірів основних параметрів субстратів: температура, вологість та рН (рис. 5).

Таблиця 3

Результати дослідження субстратів на біохімічний склад

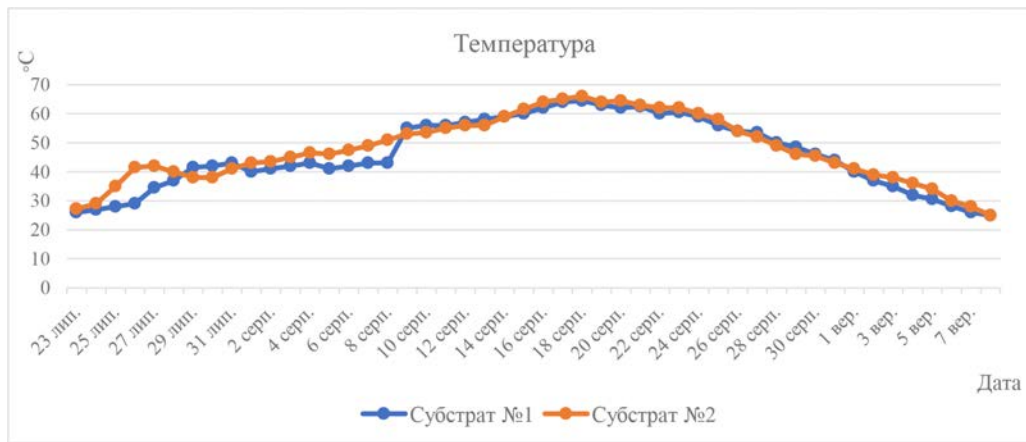
Показники	Субстрати № 1	Субстрат № 2
	Фактичний вміст, г/кг	Фактичний вміст г/кг
Масова частка сухої речовини	283,00	430,10
Масова частка органічної речовини	615,00	410,00
Загального вуглецю	272,30	153,00
N	7,6	4,5
P ₂ O ₅	3,7	1,7
K ₂ O	9,9	6,6
Cu	0,0138	0,0538
Fe	4,675	9,325
Zn	0,0887	0,0894
Co	0,002	0,0024
Ni	0,0041	0,0023
Mn	0,277	0,327
Pb	0,00101	0,00088
Cd	0,001	0,0016
Cr	0,04049	0,03421
Співвідношення C:N	10:1	15:1
Кислотно-лужний баланс, рН	9,20	8,80

Впродовж 56 діб проведення досліджень процесу аеробного компостування виконано різна кількість аерацій буртів: 6 аерацій бурта з субстрату № 1, та 8 аерацій бурта з субстрату № 2; кількість аерацій з внесенням води теж була різна – 3 внесення в бурт субстрату №1 та 4 внесення в бурт субстрату № 2. Всі операції виконувались з метою підтримання оптимального мікроклімату для розвитку колоній бактерій та мікроміцетів субстратів для повноцінного проходження основних фаз компостування. Температура та вологість за межами оптимальних діапазонів (40–60°C, 50–60% вологості) або низький рівень кисню знижують біологічну активність мікроорганізмів; високий рівень вологості зменшує кількість кисню, а низький рівень вологості може призвести до підвищення рівня температури.

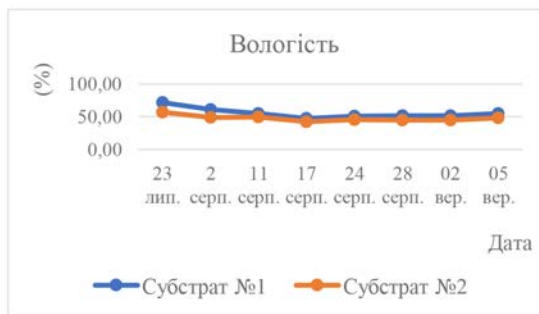
На початковому етапі аеробного компостування формування буртів із субстратів та проведення першої аерації, температура підвищується (рис. 6 а) первинно в другому бурті (вище 45°C), що обумовлено розкладанням субстрату термофільними мікроорганізмами (актиноміцети, гриби та найпростіші). В субстратах №1, 2 на



Рис. 4. Етапи дослідження аеробного компостування: а) аерація субстрату самохідним аератором BASKHUS A30; б) вимірювання показників субстрату (температура, вологість, рН)



а)



б)



в)

Рис. 5. Параметри показників субстрату в процесі аеробного компостування: а) температура, б) вологість, в) кислотність

12 добу проведено другу аерацію. Температурні показники субстрату № 2 (із включенням верхового торфу) почали поступово зростати тоді як показники субстрату № 1 ще п'ять діб тримали температуру в діапазоні від 40°C до 45°C. Відносна вологість субстрату № 1 знизилась досягнувши оптимальних для аеробного компостування показників в діапазоні 50%–60%. З 17 по 21 добу у субстратах № 1 та № 2 перехід в тер-

мофільну фазу зі зростанням температури від 57°C до 65°C та з 56°C до 66°C відповідно на 25 добу. Четверту аерацію буртів проведено із внесенням води (основна мета сповільнення процесу стрімкого зросту температури підвищення зольності компосту). Зростання температури в бурті субстрату № 2 не сповільнилась, тому було проведено додаткової п'ятої аерації без додавання води. Отже, термофільна фаза субстратів № 1 та

№ 2 протікали 16 діб, що є достатнім для повноцінного знезараження органіки в процесі аеробного компостування, після чого фіксуємо нормальний перехід в мезофільну фазу. Для повноцінного проходження основних фаз аеробного компостування необхідним є проведення процесів (сушіння, внесення вологи, насичення киснем, подрібнення складових субстратів) що сприяють підтриманню оптимального мікроклімату та розвитку колоній бактерій мікроміцетів субстратів (рис. 6). Проведено лабораторні дослідження хімічного складу готового компосту (табл. 4).

Таблиця 4

Біохімічні показники компосту

Основні показники	Компост одержаний з сировини:	
	Субстрат № 1	Субстрат № 2
	Фактичний вміст, г/кг	Фактичний вміст, г/кг
Масова частка органічної речовини	450	450
N	8,4	8,1
P ₂ O ₅	5,2	4,5
K ₂ O	14,4	12,6
Кислотно-лужний баланс, рН	8,8	8,6

Основними показниками для агрокомпаній проведеного дослідження виробництва покращувача мікробіоти ґрунту є: біохімічні показники (масова частка органічної складової; діючої речовини N, P₂O₅, K₂O; рівень рН); економічні показники (кількість операцій, об'єм внесення води). Масова частка органічної речовини 45% в компості отриманого з двох типів субстратів має однаково високий показник, бо саме органічна складова і є основою для відновлення біорозмаїття та родючості ґрунту.

Висновки. Проведено теоретичний аналіз умов і засобів технології промислового аеробного

компостування на відкритому майданчику. Експериментально (за 56 діб) визначено кількість фаз аеробного компостування (сушіння, аерація, аерація з внесенням вологи) обраної сировини при постійному контролі параметрів технологічного процесу (склад, температура, вологість, рН). Для отримання покращувачів мікробіоти ґрунту кожен з субстратів потребував різну кількість основних операцій. Компост з субстрату №1 було отримано за виконанням 6 аерацій, тоді як для компосту з субстрату № 2 знадобилося 8 аерацій. Субстрат № 2 із включенням торфу у зрівнянні із субстратами № 1 в процесі компостування потребував внесення більшої кількості вологи (4 та 3 внесення відповідно) для підтримання оптимальних умов аеробного компостування, що у свою чергу збільшує витрати на виготовлення покращувача ґрунту. Отже, кожна додаткова операція в промислових обсягах суттєво впливає на собівартість кінцевого продукту. Компост з субстрату № 2 (з включенням торфу) має більш високі показники по наявності діючої речовини (N, P₂O₅, K₂O), що є дуже важливим для розрахунків норм внесення добрив в залежності від типів культур та стану ґрунту обраного для посіву поля.

Фінансування. Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Подяки. ПП «ЕВРОСЕМ» за надання сировини, необхідної техніки, та можливості проведення наукового дослідження на виробничій ділянці свого підприємства.

ТОВ «О.П.С.» за надане обладнання, та проведення необхідних операцій в технологічному процесі промислового аеробного компостування на відкритому майданчику.

Асоціації «Компосту» за консультації та підтримку щодо технологічного процесу.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури:

1. Лагутенко О.Т. Навчальне видання агроекологія «Екологічні аспекти використання добрив у землеробстві, розділ VII, с. 91.
2. ЗАКОН УКРАЇНИ про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людиною. Розділ III, Стаття 15., п.1
3. Bernal M.P., Alburquerque J.A., Moral R., Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review, *Bioresource Technology*, Volume 100, Issue 22, 2009, P. 5444-5453.
4. Marilyn C. Erickson, Jean Liao, Li Ma, Xiuping Jiang, Michael P. Doyle, Inactivation of Salmonella spp. in cow manure composts formulated to different initial C:N ratios, *Bioresource Technology*, Volume 100, Issue 23, 2009. P. 5898-5903.
5. Wichuk, Kristine & Tewari, Jalpa & McCartney, Daryl. Plant Pathogen Eradication During Composting: A Literature Review. *Compost Science & Utilization*. 19.4, 2013. P. 244-266.
6. Tognetti, Celia & Mazzarino, Maria & Laos, Francisca. Cocomposting biosolids and municipal organic waste: Effects of process management on stabilization and quality. *Biology and Fertility of Soils*. 2007. P. 387-397.

7. Hepperly, Paul, et al. "Compost, manure and synthetic fertilizer influences crop yields, soil properties, nitrate leaching and crop nutrient content." *Compost Science & Utilization* 17.2, 2009. P. 117-126.

8. Mengchun Gao, Fangyuan Liang, An Yu, Bing Li, Lijuan Yang, Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios, *Chemosphere*, Volume 78, Issue 5, 2010. P. 614-619.

9. Nieder, Rolf, and Jörg Richter. "C and N accumulation in arable soils of West Germany and its influence on the environment-Developments 1970 to 1998." *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163.1, 2000. P. 65-72.

10. Mahr S., University of Wisconsin, Madison. Using Manure in the Home Garden. <https://hort.extension.wisc.edu/articles/using-manure-in-the-home-garden/>

Malynovskyi V.V., Mitina N.B. TECHNOLOGY OF GETTING SOIL IMPROVER BY AEROBIC COMPOSTING

Theoretically, it has been shown that the systematic application of intensive agricultural technologies significantly reduces the fertile soil layer, destroys biodiversity, spreads soil diseases, and so on. The article discloses the technology of industrial aerobic composting of animal husbandry waste, namely cattle manure. The type of technological equipment for the formation of sides and carrying out aerobic composting in production conditions on an open site is given. The results of the biochemical composition of the obtained compost from two types of substrates in different proportions were analyzed: cattle manure, bedding straw, and the addition of upland swamp peat. A block diagram of the necessary technological operations for obtaining a soil improver by aerobic composting of livestock waste has been developed. The number of phases of the aerobic composting process (drying, aeration, aeration with the introduction of moisture) of the selected raw materials was determined experimentally (in 56 days) with constant control of the parameters of the technological process (composition, temperature, humidity, pH). It was found that the formed sides of the substrates required different number of basic operations to obtain mature compost: compost from substrate No. 1 was obtained by performing 6 aerations, while compost from substrate No. 2 required 8 aerations; substrate No. 2 with the inclusion of peat, in contrast to substrates No. 1, in the composting process required the introduction of a larger amount of moisture (4 and 3 introductions, respectively) to maintain optimal conditions for aerobic composting. It is shown that each additional operation in industrial volumes will significantly affect the cost price of the final product. It was established that the compost obtained from the substrate of litter manure with the addition of top peat is almost 8,75 times higher in K_2O content than compost obtained from the litter manure of cattle, other indicators (mass fraction of the organic component, N, P_2O_5 , K_2O) are acceptable and not have significant differences. The determined biochemical indicators of the obtained compost show the possibility of its use as an improver of soil microbiota depending on the needs of plants and soil that is losing (or has lost) its fertility.

Key words: aerobic composting, compost, soil, manure composting, peat composting, organic waste, livestock waste processing, organic fertilizers, soil improver, soil microbiota.

УДК 004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/32>**Мельник В.Д.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Бандура В.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Яциняк І.І.

Івано-Франківська філія Університету «Україна»

Вацеба Б.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Глібчук А.Б.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ МУЛЬТИМЕДІЙНОГО КОНТЕНТУ НА РІВНІ ОБОЛОНКИ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

У статті розглянуто питання, що присвячені оцінці результативності інтеграції мультимедійного контенту на рівні оболонки експертної системи в контексті розробки методу інтелектуальної підтримки прийняття рішень в процесі буріння нафтогазових свердловин на основі методології масштабованих маркерів, що розглядається як основний елемент технології інтелектуального тренінгу з використанням тьюторних тренажерів як виду інтелектуальних автоматизованих систем. При побудові концептуальної предметної моделі інтелектуальної інформаційної системи виконано моделювання основних компонентів автоматизованих тренінгових систем у формі інтелектуальних тренажерів з точки зору особливостей представлення контенту тренінгового матеріалу та методів тестування, що застосовуються, в тому числі в формі емуляції ситуацій підтримки прийняття керуючих технологічних рішень. Досліджено формальні основи процесу моделювання контенту інтелектуальної автоматизованої системи на основі базової технології представлення та задоволення обмежень шляхом введення технологічних проблем з накладеними обмеженнями як ситуації інтелектуальної підтримки прийняття рішень засобом реалізованих інтелектуальних функцій інтелектуальної системи. Визначена структура релевантності щодо умов задоволення технологічних обмежень в контексті прийняття рішень, що дозволяє введення метричних характеристик формальних конструкцій в процесі побудови та імплементації абдуктивного виведення знань на основі мультимедійних входжень.

Для рішення даної задачі досліджено сутність та види абдуктивних міркувань з введеними ймовірнісними складовими процесу інтерпретації, що дозволило оцінити ефективність абдуктивного підходу в цілому при вирішенні задач класифікації на множині мультимедійного контенту з метою подальшої імплементації релевантних доменних знань, в тому числі шляхом їх видобування на основі мультимедійних даних з регульованою ймовірнісною оцінкою в формі коефіцієнтів впевненості для заданих формальних конструкцій. Запропоновано структуру алгоритмічного та програмного забезпечення системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на основі методології масштабованих графічних маркерів з накладеними обмеженнями.

Ключові слова: інтелемедіа, мультимедійний контент, інтелектуальна підтримка прийняття рішень, буріння нафтових і газових свердловин, графічні маркери, масштабованість, правила, бази знань, абдуктивний фреймворк, коефіцієнти впевненості.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день мультимедійні технології за своєю природою є статичним відображенням певних аспектів технологічних знань. І з даної позиції розбивання суцільного зображення на сітку та встановлення жорстких і динамічних маркерів є, очевидно,

єдино можливим рішенням проблеми. Першочергово було встановлено, що для прототипу системи необхідно розробити форму візуального представлення знань, щоб зробити її, відповідно, більш корисною. Тип візуальних даних оцінюється з точки зору їх важливості. В якості базового

типу при виконанні аналізу літературних джерел вибрано растровий тип зображень. Виконане порівняння мультимедійних і не мультимедійних форматів зображень даних предметної області підтвердили правильність вибраного рішення.

Відомо, що основна увага при проектуванні будь-якої експертної системи приділяється тому, щоби комп'ютерне представлення експертних даних максимально відповідало способу представлення, який використовують експерти предметної області. В проектуваному прототипі саме візуальне представлення експертних даних у формі растрових зображень визначає сутність корисності та практичної орієнтованості проектуваної системи з точки базової архітектури експертних систем (ЕС) в цілому. Експертні знання, в будь-якому випадку, не можуть бути спотворені при вибраному способі представлення. Тому використання будь-якого спрощення й узагальнення рівня представлення необхідним чином призводитиме до потенційної втрати важливої інформації про предметну область. Тому, визначивши основним завданням ефективне поєднання технології експертних систем і мультимедійних систем, очевидно, необхідно розглянути всі можливі способи графічного представлення сутностей предметної області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз питань мультимедійності даних на рівні експертних систем досліджувалось у наукових працях «Абдуктивне виведення знань про процес буріння на основі мультимедійних даних про бурове обладнання» [3], «Інтелімедійні засоби підтримки прийняття рішень в нафтогазовій справі» [5], «Формальна структура кейсів технологічних проблем в процесі побудови їх рішень на основі обмежень» [4], Інтелімедійна інформаційна система підтримки прийняття рішень в процесі буріння [2] та інших.

Питання застосування інтелімедійних інформаційних технологій аналізувалось дослідниками В. І. Шекета, Ю. Л. Романишин, О. Б. Гургула в контексті реалізації в площині навчального процесу, що відображено у відповідній науковій праці [1]. Дослідженню питань функціональності мультимедійного контенту на рівні оболонки експертних систем приділено значну увагу у працях науковців Г. Гуї (H. Gui) та Л. Ксіао (L. Xiao), які запропонували концептуальний метод проектування та впровадження системи асистента вчителя з використанням технології штучного інтелекту для взаємодії людини та комп'ютера, особливо при впровадженні інтелектуальної системи навчання (ICH). Площину проектування

асистента викладання на основі експертної системи може бути використано в будь-якій галузі, де експертам необхідна допомога при виконанні завдань, а особливо з використанням методів ICH в контексті експертних систем [6].

Також про це говорять й інші дослідники Й. Чен (J. Chen), Є. Є (Y. Ye), Л. Йіанг (L. Jiang) та Є. Йіанг (Y. Jiang), що зробили спробу аналізу інтеграції мультимедійного контенту на рівні оболонки експертних систем базуючись на дослідженні питань технології графів в контексті експертних знань. Як зазначають дослідники Й. Чен (J. Chen), Є. Є (Y. Ye), Л. Йіанг (L. Jiang) та Є. Йіанг (Y. Jiang) експерти в різних галузях провели широкі дослідження з побудови графів знань та успішно застосовують їх у таких сервісах, як пошук знань, питання-відповідь та рекомендація знань. Беручи дані про аварії на нафто- і газопроводах як основне джерело даних, відповідна інформація видобувається шляхом розробки концептуальної моделі, вилучення знань та інших кроків. Тому застосування графу знань в області аварій дозволяє зберігати та візуалізувати інформацію про безпеку нафто- і газопроводів [7].

Інші вчені також досліджували це питання. На думку дослідників Л. Лі (L. Li), Є. Лу (Y. Lu), Л. Ліу (L. Liu) та Є. Гао (Y. Gao), згідно їх наукової праці «Design and Implementation of Collaborative Learning Algorithm for Vocational Education Based on Multi Agent System», пропонують алгоритм спільного навчання у професійно-технічній освіті на основі мультиагентних систем (МАС), що направлені на ефективне підвищення ефективності навчання та результативності професійно-технічної освіти за допомогою спільної співпраці між агентами. Шляхом побудови агентів з певними атрибутами та моделями поведінки, а також визначення методів взаємодії та механізмів комунікації між агентами [8].

Постановка завдання. Метою статті є оцінка результативності інтеграції мультимедійного контенту на рівні оболонки експертної системи в контексті розробки методу та системи інтелімедійної підтримки прийняття рішень при виконанні технологічних операцій в процесі буріння нафтогазових свердловин у вигляді порівняння запропонованих пакетів прикладних рішень. Досягнення вказаної мети забезпечується шляхом розв'язання таких задач: аналіз предметної моделі інтелімедійної інформаційної системи, формалізація постановки задачі моделювання процесів інтелімедійної підтримки прийняття рішень при виконанні технологічних операцій процесу буріння шляхом

вирішення технологічних проблем з накладеними обмеженнями в рамках абдуктивного фреймворку, обґрунтування та дослідження технології інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виконанні технологічних операцій в процесі буріння нафтових і газових свердловин в умовах невизначеності, побудова формальної структури функціонування системи процесів підтримки прийняття рішень при оперуванні з мультимедійним контентом на кожному етапі життєвого циклу, розробка формального механізму підтримки прийняття рішень оператором в технологічному процесі буріння нафтових і газових свердловин на основі оперування з класифікованими входженнями мультимедійного контенту предметної області, реалізація системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень при виконанні технологічних операцій в процесі буріння нафтових і газових свердловин та розробка методики інтелектуальної підтримки прийняття рішень щодо вибору технологічних операцій в процесі буріння на основі систем масштабованих маркерів з накладеними обмеженнями.

Виклад основного матеріалу. Запропоноване у статті дослідження присвячене оцінці результативності інтеграції мультимедійного контенту на рівні оболонки експертної системи в контексті розробки та реалізації інтелектуальної системи з мультимедійним інтерфейсом та базою знань з мультимедійними включеннями. При створенні прототипу інтелектуальної автоматизованої системи було розглянуто ряд аргументів, які також можна успішно застосувати для задачі створення інтелектуальної системи, яка оперує з мультимедійним контентом. Основна проблема полягає в досягненні ефективності процесу перенесення експертних знань та досвіду в комп'ютерну оболонку. Основна особливість полягає саме в тому, що такі знання та досвід опираються на мультимедійну основу. Загально відомо, що використання мультимедійних даних та технологій на даному етапі розвитку інформаційних технологій пов'язано з рядом обмежень, які суттєво впливають на кожен етап життєвого циклу розробки інтелектуальних систем. Тому в якості основної проблеми можна виділити проблему практичної імплементації шляхом інтеграції технології інтелектуальних систем та технології мультимедійних систем і даних, які, кожна в своєму класі, є, в принципі, достатньо дослідженими, але в питаннях їх інтеграції, яка дозволить збереження саме інтелектуальних функцій, є ряд невирішених аспектів, яким, власне, і присвячене це дослідження.

Важливим аспектом досліджуваної проблеми є також тестування отриманого прототипу системи з метою оцінки ефективності її функціонування, зокрема, в задачах підтримки прийняття рішень. Як показує досвід, для створення ефективної інтелектуальної системи необхідно вирішити ряд допоміжних проблем. Особливо тоді, коли система поєднує в собі різнопланові технології. Зокрема, в мультимедійній експертній системі важливо визначити, яким найкращим чином представляти експертну інформацію, використовуючи всі доступні мультимедійні можливості. Проте рішення задачі інтеграції мультимедіа в існуюче оточення не може вирішуватися за рахунок порушення цілісності основної архітектури експертної системи. Слід виходити з того, що мета використання мультимедіа полягає в доповненні вже існуючої бази знань таким чином, щоб її можна було застосовувати більш ефективно. Тобто, мультимедійні включення не мають на меті заміну бази знань як основного компоненту, а використовуються як доповнюючий елемент. Те ж стосується інтерфейсу. Ознакою високоякісної експертної системи є тісний зв'язок між інформацією (знаннями) і способом її представлення. В ідеальному випадку, експертна система з певною точністю дублюватиме міркування експерта, презентуючи такі міркування як вид знань. Проте в більшості предметних областей така ідеальна відповідність є неможливою. Тому переважно використовується спеціалізовані методи представлення знань, які споріднені зі специфікою роботи експерта. Однак, змінюючи способи представлення знань, завжди існує небезпека порушення цілісності такого представлення і, як наслідок, порушення цілісності самої системи. Тому верифікація цілісності (Data Integrity для баз даних, Logical Consistency для баз знань) є необхідним інструментом, що повинен бути інтегрований в ядро системи та складати невід'ємну частину її функціональності. В даному контексті саме мультимедійні засоби є тією доступною технологією, яка дозволяє точну імітацію уявлень експерта з конкретного знання (предметної області). Оскільки такі дані інтегруватимуться через інтерфейс, то, відповідно, необхідно чітко визначати, які складові інтерфейсу є необхідними, а які, відповідно, доповнюючими. Для цього необхідно встановити черговість представлення форматів даних, щоб експерт зміг визначити найбільш важливі елементи і включити їх як мінімально необхідні.

В контексті дослідження базовим елементом при формуванні експертної навчальної або тех-

нологічної системи слід вважати специфіку представлення експертних даних в руслі аналізованого мультимедійного представлення на базі спеціалізованого програмного та апаратного рішення. Саме проєктоване мультимедійне представлення потребує детального структурного аналізу. Це, в свою чергу, досягається застосуванням інтелектуальних включень на основі метатегів у мультимедійний інтерфейс програмованого рішення. Також передбачено обов'язковість інтеграції з іншими програмними реалізаціями (наприклад, експертною системою), не обмежуючи особливості поєднання з іншими експертними системами, які не впливають на складність інтерфейсу. Особливістю якісного мультимедійного представлення слід вважати, по-перше, мультимедійні дані, що ґрунтуються на експертних знаннях, та необхідність спроектованого технічного забезпечення для ефективної інтеграції інтелектуальних даних у навчальну експертну систему, а також мультимедійне представлення позиціонує важливість інтеграції анімаційних елементів і графічних представлень у навчальний або технологічний процеси.

Проєктоване програмне рішення порівнює інтелектуальну автоматизовану систему (ІМАС) – підхід із традиційним програмуванням, у якому один скрипт контролює всі властивості базової програми. Цей підхід «скрипт-майстер» добре працює, коли програма є спрощеною за своєю природою, але дуже швидко ускладнюється, при спробі виконання інтеграції методів гіпермедіа. «Скрипт-майстер» підходить для програми, виконання якої здійснюється наперед визначеним лінійним шляхом. В цілому підхід «скрипт-майстер» є інструментом, що дозволяє користувачам без глибоких знань програмування створювати та налаштовувати логіку роботи інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР). Це своєрідний візуальний редактор, що пропонує користувачу набір готових блоків (скриптів), які можна поєднувати між собою для створення складних алгоритмів прийняття рішень. Тому перевагами цього підходу в контексті визначеної проблеми аналізу є простота у використанні (непотрібно знань мов програмування), гнучкість та адаптивність (можливість створення складних алгоритмів прийняття рішень), процес швидкої розробки (скрипти можна створювати швидко та легко змінювати й адаптувати), неодноразовість у засосуванні (створені скрипти можна використовувати в різних проєктах), а також процес інтеграції з іншими системами (скрипт-майстер часто

інтегрується з іншими системами, що дозволяє використовувати масиви даних з різних джерел). Програмне рішення, прототип інтелектуальної інформаційної системи підтримки прийняття рішень у процесі буріння, є більш адаптивнішим у використанні при застосуванні методів гіпермедіа, тобто, воно виконується нелінійним шляхом, а залишається за користувачем. Наприклад, програмні рішення «ToolBook» та «Microsoft Visual Basic» – інструменти в середовищі Microsoft Windows. Ці пакети використовують більш інтуїтивний підхід до програмування мультимедійної аплікації, такої як прототип системи підтримки прийняття рішень у процесі буріння. Обидва ці пакети використовують підхід об'єктно орієнтованого типу для розробки системи. Цей підхід дозволяє використання гіпермедіа, дозволяючи об'єктам відправляти й отримувати повідомлення. Таким чином, жоден «скрипт-майстер» не повинен знати шлях, який кожен окремий користувач приймає в системі. Це може бути покладено на користувача, хоча програміст може ввести обмеження, якщо необхідно. Гнучкість, що забезпечується подієво-керованою програмою, спрощує завдання програмування для нелінійних програм. Для того, щоб це оцінити, в дослідженні розроблено таке ж програмне рішення з використанням усіх вищезазначених мультимедійних авторських пакетів, крім «Visual Basic».

Метою дослідження було порівняти ці пакети за різними спільними рисами. Оцінка кожного середовища полягала у вивченні їх можливостей авторизації, а також можливостей, які стосуються якості кінцевого продукту, що отримує користувач. Автор виявив, що середовище «ToolBook» є гнучким тому, що воно забезпечує спрощення ярликів для новачків, щоб розробити прості системи. Варто зазначити, це досить складно і важче для вивчення при проєктуванні складної мультимедійної системи. Після регульованого порівняння пакетів дослідник дійшов до висновку, що «Toolbook» є, безсумнівно, найпотужнішим і найгнучкішим із оцінюваних пакетів.

При виборі мультимедійного програмного забезпечення відіграють роль ряд факторів. Доречним є вибір відомого середовища, щоб зосередити навчальний процес на компонентах системи, а саме: на експертній системі та мультимедійному інтерфейсі. Вдається дослідити більш детально ті питання, які стосуються комбінації двох технологій, не витрачаючи значні зусилля для вивчення нового середовища розробки. Варіанти, доступні для програмного забезпечення

експертних систем, можуть слугувати тільки для перевірки такого рішення. «Visual Basic», у порівнянні з «ToolBook», не має формальної оцінки його можливостей (особливо, мультимедійних). Тому використання «ToolBook» є преференційним. Процес здійснення розробки експертної системи вважають непростим завданням. Дослідники порівнюють зазначений вище процес із розробкою пакета обробки тексту або електронної таблиці, адже мета дослідження полягає у конкретизації проблеми поєднання робочих середовищ – експертної системи та мультимедіа. Сам процес дослідження є більш ефективним при створенні інтелектуальної системи, що використовує представлення знань у формі мультимедійного контенту для отримання можливості звернення суб'єкта навчання до поточних актуальних питань самого навчального процесу.

Найпростішим варіантом розв'язку задачі розробки інтелектуальної системи, що використовує представлення знань у формі мультимедійного контенту, є використання існуючої класичної оболонки експертної системи. Визначено питання для відбору оболонки класичної експертної системи. Дослідження авторів було використано як основа для подальшої розробки методу оцінки наявних оболонок експертних систем. Припустимо, що вибір оболонки експертної системи базується на чотирьох етапах: визначення необхідних функцій і можливостей, виявлення потенційних оболонок, оцінка оболонок на основі необхідних функцій і можливостей, вибір відповідної оболонки.

У процесі дослідження визначено декілька потенційних можливостей і функцій аналізованої системи-прототипу. Ці характеристики представлені у вигляді ключових визначень, поданих на рисунку 1. Характеристики оболонки експертної системи: робота з «Microsoft Windows», з'єднання з «Esta/Stress», ланцюг прямого логічного висновку, мова програмування, засоби обґрунтування, технічна підтримка, документація та підручники, збереження виконаних операцій, підтримка істинності, вирішення суперечностей, управління невизначеністю, швидкість розробки прототипу. Слід зазначити, що всі оболонки експертних систем працюють на персональних комп'ютерах. Таким чином, однією з базових вимог дорозглянутих оболонок була доступність для використання на обраному персональному комп'ютері. Список потенційних характеристик оболонок і їх відображення в реальних системах представлено на малюнку 1. Оцінка оболонок складається з двох етапів. Перші три характеристики, представлені

на рисунку 1, передбачають мінімальні вимоги, які слід вважати необхідними. Априорі, експертна система повинна відповідати зазначеним вимогам, тому будь-яка оболонка експертної системи, яка не відповідає цим критеріям, не розглядалась. Найбільш важливою з передбачених вимог є можливість з'єднувати вибрану оболонку експертної системи з «Esta/Stress» у середовищі «Microsoft Windows», оскільки вона була обрана як програмне забезпечення для розробки інтелектуальної системи-прототипу з використанням мультимедійного інтерфейсу.

Потреба в методі прямого ланцюга логічного висновку (одна з типових характеристик ЕС) пов'язана з характером інтелектуальної системи-прототипу. Цей тип інтелектуальної системи полягає у формуванні висновків на основі обмеженого числа визначених даних. Припускалося, що в інтелектуальній системі-прототипі може бути деяке число «рішень» на основі конкретних характеристик окремих параметрів. Тому використання прямого процесу ланцюга міркувань – основний критерій формування проектованої інтелектуальної системи в процесі зворотного логічного висновку.

Вибір аналізованих оболонок для створення експертних систем базувався на аналізі перших трьох зазначених критеріїв. Для подальшого аналізу та порівняння вибрано оболонку «Esta/Stress». Другий етап оцінки оболонок експертних систем базувався на порівнянні другорядних характеристик цих оболонок для подальшого визначення сумісності з проблемною галуззю. Оцінка мови щодо програмування кожної оболонки здійснювалась на основі характеристик «легкості розуміння» та «гнучкості». Функція гнучкості визначалася здатністю додавати нові можливості до оболонки експертної системи або змінювати поточні для реалізації в конкретному рішенні. З наявних оболонок експертних систем використано програмне рішення «Esta/Stress». Засоби обґрунтування щодо використання оболонки експертної системи дозволяли реалізувати інтелектуальну систему в конкретному інформаційному продукті. Ця характеристика розглядалася з точки зору гнучкості. Інші характеристики, містять засоби обґрунтування, тобто вони є менш гнучкими, тому що не піддаються програмуванню. Програмований засіб обґрунтування, властивий «Esta/Stress», забезпечує розробника інтелектуальної системи гнучкістю представлення знань. Важливим є вибір технічної підтримки для використовуваного програмного забезпечення. Технічна підтримка реалізується у вигляді експерта,

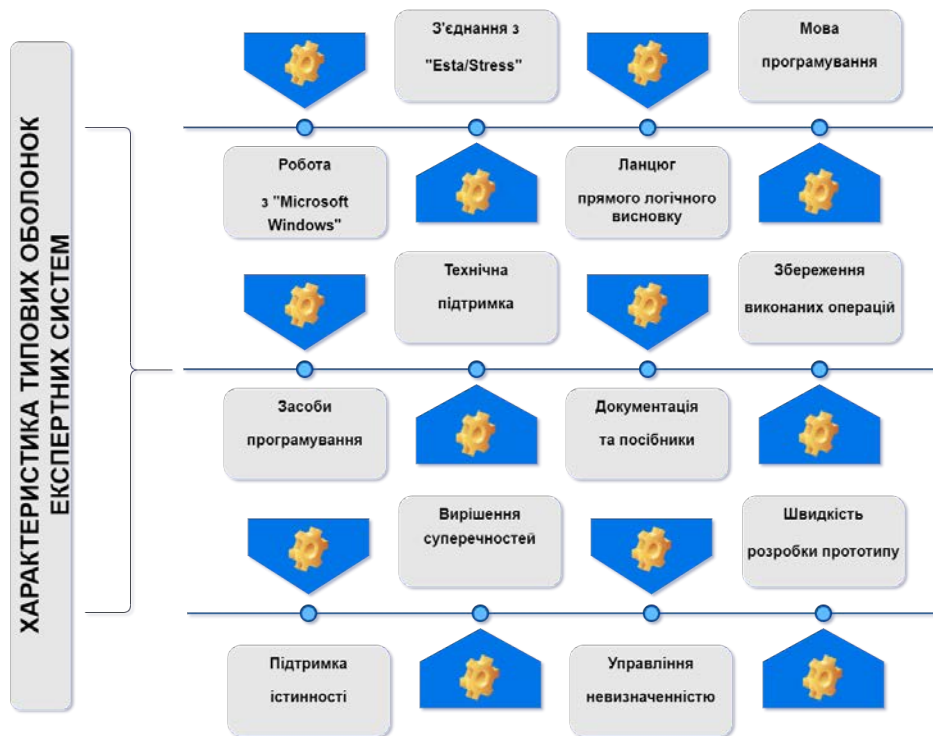


Рис. 1. Характеристика типових оболонок експертних систем

ознайомленого з продуктом, при виникненні проблеми з його використанням. У нашому випадку оболонка «Esta/Stress» забезпечує повну програмну та технічну підтримку реалізації інформаційного продукту. Інші види оболонок експертних систем є менш придатними в досліджуваній галузі.

Невід’ємним елементом технічної підтримки для використовуваного програмного забезпечення в контексті проєктованої інтелектуальної системи є повний доступ до відповідного документального супроводу та посібників із аналізованої проблеми. Саме зручність використання інтелектуальної системи полягає в забезпеченні простоти використання та застосування елементів зміни таким чином, щоб суб’єкт діалогу зміг зупинитись на середині процесу і мати можливість відновити сеанс, зберігаючи всі поточні зміни. Це стосується об’ємних складних систем, які передбачають введення експертом великих обсягів даних.

Ще одним важливим аспектом експертної системи є її адаптивність – здатність до змін у конкретних даних. Інша характеристика однієї з типових оболонок ЕС – підтримка істинності. У цьому випадку експертна система здатна розпізнавати недостовірність окремих даних у контексті їх зміни. Характеристика здатності підтримки істинності пов’язана з можливістю виконувати аналіз параметрів, змінюючи деякі дані для визначення

їх впливу на зроблені висновки. Оболонка «Esta/Stress» є оптимальною в конкретному випадку, оскільки здатна забезпечувати підтримку істинності.

Інша характеристика оболонки ЕС – вирішення суперечностей, що є також важливим для експертної системи. Процес вирішення суперечностей побудований на принципі використання конкретного пріоритету відповідно до правил, реалізованих у базі знань. Якщо задоволено умови двох або більше правил, тоді експертна система визначає послідовність застосування першочерговості. Також, «Esta/Stress» є оптимальною оболонкою, яка забезпечує фіксоване вирішення суперечностей. Користувач за необхідності може визначити конкретні пріоритети для кожного правила. Також одночасно передбачене виконання двох і більше правил. Система володіє внутрішньою методикою вибору одного правила й можливістю постійного продовження роботи.

Ще одна характеристика оболонки ЕС – простота й легкість розробки системи-прототипу. Це важливо, адже період розвитку для системи-прототипу обмежений. Було виявлено, що прототип однієї системи зробити швидше і легше, ніж прототипи інших систем.

Однією з базових концепцій та можливостей експертних систем (в руслі «Esta/Stress») є їх здатність оперувати з невизначеністю. Екс-

пертна система може керувати невизначеністю, дозволяючи користувачеві формувати запитання для можливості надати оцінку та переконатися, що вони дійсно належать цій системі. Висновки, сформовані експертною системою, також можуть бути невизначеними; належна оболонка експертної системи буде забезпечувати конкретні засоби, що включатимуть заходи невизначеності в цих висновках. Ряд систем (наприклад, система «Esta/Stress») здійснюють керування фактами та правилами невизначеності.

Висновки. В результаті дослідження було встановлено, що програмне рішення у вигляді експертної системи «Esta/Stress» є більш оптимальними та доступними оболонками експертних систем. Хоча слід зазначити, що ці оболонки, на відміну від інших аналізованих, не є оптимальними для швидкого прототипування, хоча система є більш гнучкою і більш потужною в порівнянні з іншими доступними оболонками. «Esta/Stress» пропонують потужну макромову програмування, що доповнюється можливістю вставляти код з інших мов програмування високого рівня та представленням гнучкого механізму обґрунтування. Підхід «скрипт-майстер» є потужним інструментом для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Він дозволяє користувачам без спеціальних знань створювати складні алгоритми і автоматизувати різноманітні

завдання. Завдяки своїй гнучкості і простоті використання, скрипт-майстер знаходить все більш широке застосування в різних сферах діяльності.

Програмний продукт «Esta/Stress» забезпечує повну підтримку процесу прямого ланцюга логічного висновку. Інші оболонки надають слабку підтримку прямого логічного висновку, що може лише ускладнити інтелектуальну систему в контексті регулювання процесу логічного висновку для задоволення потреби конкретного проекту. Подальші дослідження аналізу та перспектив розвитку інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень в процесі буріння нафтогазових свердловин на основі методології масштабованих маркерів будуть реалізовуватись та розвиватись у паралелі з розвитком інтегрованих програмних середовищ та новітніх інформаційних технологій

У дослідженні визначено, що середовище «Esta/Stress» буде найкращим для процесу програмування інтелектуальної системи з мультимедійним контентом. Ці пакети програмного забезпечення доступні в середовищі «Microsoft», обраного для апаратного забезпечення. Це програмне рішення та апаратні засоби, що використовуватимуться для розвитку прототипу інтелектуальної системи представлення знань в формі мультимедійного контенту, є базованими на знаннях, тобто системами класу «Knowledge Based Intelligible System with Multimedia Content».

Список літератури:

1. Мельник В.Д., Шекета В.І., Романишин Ю.Л., Гургула О.Б. Застосування інтелектуальних інформаційних технологій в навчальному процесі. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., (Івано-Франківськ, 23–28 трав. 2016 р.). Івано-Франківськ, 2016. С. 62–64.
2. Шекета В.І., Мельник В.Д., Гобир Л.М. Інтелектуальна інформаційна система підтримки прийняття рішень в процесі буріння. *Проблеми інформаційних технологій*. 2016. № 1. С. 96–116.
3. Мельник В.Д. Абдуктивне виведення знань про процес буріння на основі мультимедійних даних про бурове обладнання. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. № 1(40). С. 80–91.
4. Мельник В.Д. Формальна структура кейсів технологічних проблем в процесі побудови їх рішень на основі обмежень. *Математичні машини та системи. Науковий журнал Інституту проблем математичних машин та систем НАН України*. 2016. № 2. С. 116–127.
5. Мельник В.Д., Шекета В.І. Інтелектуальні засоби підтримки прийняття рішень в нафтогазовій справі. *Молодий вчений*. 2019. № 5 (69). С. 268–271.
6. H. Hui and L. Xiao. Assistant Teaching System Design Based on Expert System. *2023 3rd International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNBC)*. Tumkur, India. 2023. P. 1-6, doi: 10.1109/ICMNBC60182.2023.10435766.
7. J. Chen, Y. Ye, L. Jiang and Y. Jiang., Construction and Application of Knowledge Graph for Oil and Gas Pipeline Accidents Based on Graph Database. *2024 5th International Conference on Information Science, Parallel and Distributed Systems (ISPDS)*, Guangzhou, China. 2024. PP. 295-299, doi: 10.1109/ISPDS62779.2024.10667536.
8. L. Li, Y. Lu, L. Liu and Y. Gao. Design and Implementation of Collaborative Learning Algorithm for Vocational Education Based on Multi Agent System. *2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Autonomous Robot Systems (AIARS)*, Bristol, United Kingdom. 2024. PP. 398-403, doi: 10.1109/AIARS63200.2024.00080.

Melnyk V.D., Bandura V.V., Yatsyniak I.I., Vatsaba B.V., Hlibchuk A.B. EFFICIENCY EVALUATION OF MULTIMEDIA CONTENT INTEGRATION AT THE LEVEL OF THE EXPERT SYSTEM SHELL

The article is devoted to evaluating the effectiveness of the integration of multimedia content at the level of the expert system shell in the context of developing a method of interactive decision support in the process of drilling oil and gas wells based on the methodology of scalable markers, which is considered as the main element of intelligent training technology using tutor simulators as a type of intelligent automated systems. By the constructing of the conceptual model of the subject of intellimedia information system, the basic components of the automated training systems was modelled for achieving the form of intelligent simulators in terms of features that represent the content of training materials and the methods of testing, including in the form of decision-support situations emulation control for projected technological solutions. The basics of simulation process for content of intellimedia automated system were studied based on the core technology of representation and constraint satisfaction theory by introducing the concept of technological problems with constrains situations as intelligent decision support tool implemented main intelligent features of intellimedia system. The structure meets the relevant conditions regarding technological constrains in the context of decision making and it allows the introduction of metric characteristics of formal structures in the process of building and implementing knowledge abductive output based on multimedia entries. The essence and types of abductive reasoning with imposed probabilistic component of the interpretations were analysed that allowed to evaluate the effectiveness of abductive approach as a whole by solving problems of classification on the set of multimedia content in order to facilitate the implementation of relevant domain knowledge, including their extraction from media with variables probabilistic estimation in the form of confidence factors for scalable markers with imposed constraints tool developing. The structure of algorithmic and system software for decision-making support based on the methodology of scalable graphic markers with imposed constraints was created for the existing intellimedia environment.

Key words: *intelligent media, multimedia content, intelligent decision support, oil and gas drilling, graphical markers, scalability, rules, knowledge bases, abductive framework, confidence factors.*

УДК 67.06 : 666.9.022.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/33>**Мельник Л.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Свідерський В.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Колобовнікова Є.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД І КОНЦЕНТРАЦІЯ АНДЕЗИТУ ЯК ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ**

У статті досліджено вплив гранулометричного складу та концентрації відсівів андезиту на фізико-механічні властивості полімерних композитів на основі стирол-бутадієнової водної дисперсії марки Latex 2012. Композити з мінеральними наповнювачами активно застосовуються в промисловості завдяки можливості покращення міцності, зносостійкості та інших експлуатаційних характеристик. Одним із перспективних наповнювачів є андезит, який за рахунок своєї кристалічної структури та високої твердості може значно підвищити якість полімерних композитів. Однак оптимальні властивості композитів можуть бути досягнуті лише за умови правильного підбору фракційного складу та концентрації наповнювача.

У ході дослідження було використано три види андезитових фракцій: суміш фракцій (A_{nf}), крупнодисперсну монофракцію (A_{mz}) з частинками розміром 0,16–0,20 мм та тонкодисперсну фракцію (A_{md}) з частинками розміром менше 0,1 мм. Концентрація наповнювача варіювалася від 55 до 85 мас.%. Результати експерименту показали, що суміш фракцій андезиту при концентрації 85 мас.% забезпечує максимальні показники модуля пружності та зносостійкості композиту, що пояснюється рівномірним розподілом частинок різного розміру, що створює міцну міжфазну зону. Водночас, тонкодисперсна фракція в концентраціях 65 та 75 мас.% продемонструвала високу щільність та знижене водопоглинання, що є важливими факторами для забезпечення довговічності матеріалу.

Також встановлено, що з підвищенням концентрації андезиту загальна пористість композитів зменшується, що знижує їхню проникність для вологи та підвищує стійкість до зовнішніх факторів. Відкрита пористість та водопоглинання виявилися найнижчими у зразків з тонкодисперсним наповнювачем, що свідчить про більш щільну структуру композиту. Показники стирання також залишаються на низькому рівні при високих концентраціях андезиту, що забезпечує довговічність композиту в умовах механічного тертя.

Таким чином, дослідження підтвердило, що використання андезиту як наповнювача дозволяє значно покращити експлуатаційні властивості полімерних композитів. Вибір оптимального фракційного складу та концентрації наповнювача забезпечує високу міцність, низьку пористість і стійкість до зносу, що робить такі матеріали перспективними для застосування в будівництві, машинобудуванні та інших галузях промисловості.

Ключові слова: композит, наповнювач, андезит, латекс, гранулометричний склад, модуль пружності, концентрація, пористість.

Постановка проблеми. Забезпечення довговічності та економічності композиційних матеріалів, які використовуються у різних галузях промисловості, значною мірою залежить від властивостей їх компонентів, і, в першу чергу, від властивостей наповнювача, якщо мова йде про високонцентровані системи. Вибір відповідного наповнювача здатний суттєво покращити механічні характеристики

композиту, такі як зносостійкість, міцність та стійкість до стирання. Одним із перспективних матеріалів для використання як наповнювачі полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є андезит – магматична порода, що відзначається високою міцністю, доступністю та сприятливим хімічним складом. В даному дослідженні мова йде не про сам андезит, а про відходи його виробництва у формі відсівів.

З літературних джерел [1, 2] відомо, що ефективність таких композитів значною мірою залежить від форми часток, гранулометричного складу та концентрації наповнювача. Однак вплив цих параметрів на пористість, щільність, модуль пружності та абразивну стійкість композиту з андезитом недостатньо вивчений, що ускладнює оптимізацію для конкретних умов експлуатації. Таким чином, існує необхідність у дослідженні впливу гранулометрії та концентрації відсівів андезиту як наповнювача на властивості полімерного композиту, щоб забезпечити більш ефективне його використання в промислових умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях полімерні композити з мінеральними наповнювачами знаходять широке застосування в промисловості завдяки їх високій міцності, зносостійкості та довговічності. Одним із перспективних напрямків є застосування полімербетонів з різними типами мінеральних наповнювачів, що покращують механічні та фізико-хімічні властивості композитів.

Зокрема, експериментальна робота [3] демонструє ефективність часткової заміни цементу на андезитовий пил у цементних композитах. Встановлено, що при заміщенні до 15% цементу відходами андезиту, композити демонструють покращені показники міцності та знижене водопоглинання завдяки зменшенню щільності порової структури. При вищих рівнях заміщення, таких як 30%, спостерігається значне збільшення здатності до деформації при вигині та розтягуванні, що підкреслює потенціал андезиту для підвищення еластичності матеріалу.

В роботі [4] досліджували можливість заміни традиційного керамічного шамоту на андезитові відсіву у виробництві пористої кераміки. У роботі зазначено, що андезит як магматична порода має хімічний і мінералогічний склад, який забезпечує високу стійкість до впливу високих температур і добру міцність при використанні його як наповнювача для керамічних виробів. Застосування андезитових відсівів дозволяє зменшити загальні витрати енергії у виробництві, оскільки їх використання замість шамоту знижує температуру випалу кераміки. Важливим є те, що кераміка на основі андезиту має високу відсоткову частку відкритих пор, що робить її перспективною для застосування в системах фільтрації та очищення.

У роботі [5] дослідження зосереджується на використанні геополімерних розчинів, виготовлених із відходів андезитового пилу (WAD), як альтернативного будівельного матеріалу, що може

замінити портландцемент і знизити викиди CO_2 , пов'язані з його виробництвом. Геополімери створювали шляхом активації WAD за допомогою силікату натрію та визначення оптимальної концентрації Na_2O (6%, 8% і 10%) у поєднанні з термічним затвердінням при різних температурах (60°C, 75°C і 90°C) і тривалостях (8 годин і 24 години). Показники міцності на вигин (f_s) і стиск (f_c) оцінювали на 1, 28 і 56 день, досліджуючи також вплив високих температур і різних режимів охолодження на властивості міцності та мікроструктуру матеріалів. Геополімери на основі WAD показали значне зниження міцності при водяному охолодженні, що обґрунтовується збільшенням мікротріщин.

Постановка завдання. Видобуток андезиту супроводжується утворенням великої кількості відсіву (10–30% від обсягу видобутої породи), що призводить до негативного впливу на екосистеми. Відсіву андезиту, які накопичуються на місцях видобутку, займають великі площі, це, в свою чергу, потребує розробки ефективних методів утилізації таких відходів. Водночас відомо, що андезит володіє значними фізико-механічними властивостями, які можуть бути корисними при використанні цих відсівів як наповнювача для полімерних композитів, зокрема для підвищення їхньої міцності, жорсткості, термічної та хімічної стійкості. Таким чином, використання відсівів андезиту як наповнювача не тільки сприяє вирішенню проблеми накопичення відходів, але й надає можливість створення матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками для широкого спектра застосувань.

Метою цього дослідження є обґрунтування можливості та доцільності використання відходів андезиту як ефективного наповнювача для створення висококонцентрованих полімерних композитів із покращеними експлуатаційними характеристиками. Дослідження спрямоване на оцінку фізико-механічних властивостей відсіву андезиту та визначення його придатності для використання в полімерних композитах. Особлива увага приділяється аналізу впливу гранулометричного складу відсівів андезиту на механічні властивості полімерних композитів, оскільки розмір і форма частинок можуть істотно впливати на властивості кінцевого матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом цього дослідження є композиційні матеріали на основі системи андезит–сополімер з підвищеною концентрацією наповнювача, що змінюється в межах 55–85 мас.%. Дослідження включають застосування комплексу фізико-хімічних методів для аналізу анде-

зитових відсівів і композитів на їх основі. Гранулометричний склад визначався методами ситового аналізу, та досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM. Абразивну стійкість тестували відповідно до ДСТУ Б.В.2.7-212:2009 за допомогою круга Беме, а модуль пружності при стиску визначали відповідно до методики [6].

Процес виготовлення композиту передбачав використання водної стирол-бутадієнової дисперсії марки Latex 2012 як матриці та відсівів андезиту з Хустського кар'єру Закарпаття як наповнювача. Детальний опис хімічного та мінералогічного складу поверхні наповнювача, а також властивостей зв'язуючого представлено в попередніх роботах [7, 8, 9, 10, 11].

Також комплексний ІЧ-аналіз [11], ДТА-ТГ-аналізи, а також характеристика порової структури представлені в наших поданих роботах.

Коротко узагальнюючи попередні дослідження слід відмітити, що відсів андезиту, що використані у цьому дослідженні, характеризуються високим вмістом SiO_2 , при цьому співвідношення $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ становить 3,5. Відсів має розвинену питому поверхню, яка становить $11,91 \text{ м}^2/\text{г}$ (за даними методу БЕТ). ТГ-аналіз показав втрату маси на рівні 4,2% у діапазоні температур $200\text{--}650^\circ\text{C}$, що вказує на виділення зв'язаної води.

Гранулометричний склад та морфологія частинок андезиту мають важливе значення для рівномірного розподілу в полімерній матриці, що впливає на технологічні та експлуатаційні характеристики композитів. Гранулометричний та електронно-мікроскопічний аналіз показав, що частинки мають бімодальний розподіл за розмірами: близько 5% частинок менше 63 мкм, тоді як понад 40% – більше 630 мкм (рис. 1).

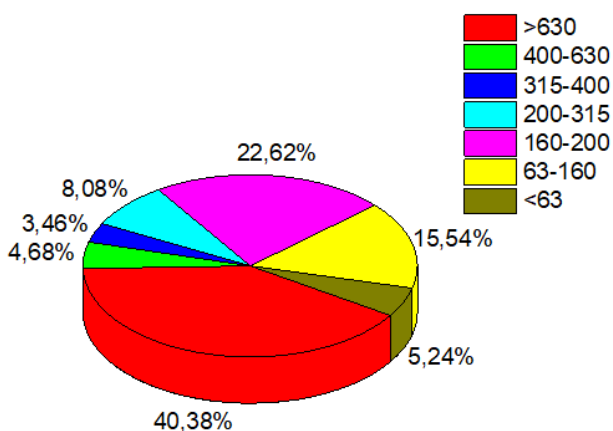


Рис. 1. Гранулометричний склад досліджуваного зразку відсівів андезиту (після попередньої подрібнення)

Частинки відсівів андезиту, зазвичай, мають нерегулярну та кристалічну форму, що надає їм механічні переваги в полімерних композитах. Завдяки нерівній і шорсткій поверхні вони ефективно взаємодіють з полімерною матрицею, підвищуючи адгезію між наповнювачем і зв'язуючим. Це призводить до підвищення механічної міцності композиту, оскільки нерегулярна форма частинок забезпечує краще механічне зчеплення. Особливо значущим є те, що приблизно 40% частинок мають розмір понад 630 мкм, що робить їх оптимальними для створення жорстких і стійких до навантажень композитів.

Дані електронної мікроскопії (рис. 2) підтверджують, що частинки відсіву андезиту мають нерівну, сколчасту форму, а їхні розміри узгоджуються з результатами гранулометричного аналізу. Крім того, спостерігається певна кількість частинок, близьких до нанорозмірів.

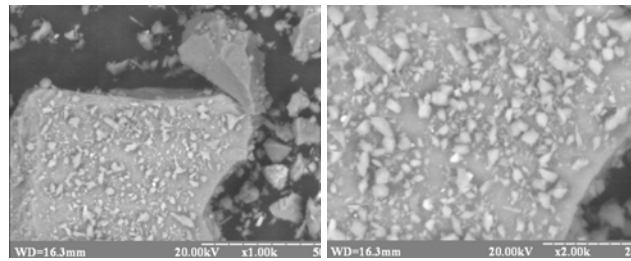


Рис. 2. Електронна мікроскопія зразку відсівів андезиту

Розмір, форма і розподіл частинок наповнювача впливають на рівномірність їх розподілу в полімерній матриці, що, в свою чергу, визначає такі властивості композиту, як структурна цілісність, щільність, пористість і стійкість до зовнішніх навантажень. Менші та більш рівномірно розподілені частинки, як правило, збільшують площу поверхні, що контактує з матрицею, тим самим забезпечуючи міцніший зв'язок між наповнювачем і полімером. Це сприяє підвищенню механічної міцності і зменшенню пористості композиту.

У цьому дослідженні вивчено композитні системи сополімеру Latex 2012 – відсів андезиту, при варіації гранулометричного складу андезиту як наповнювача. Досліджувані зразки включали поліфракційний андезит ($A_{\text{пф}}$), а також спеціально підібрані за розміром часток проби: монофракційну ($A_{\text{мф}}$) з крупнодисперсними частинками розміром $0,16\text{--}0,20 \text{ мм}$ і тонкодисперсну ($A_{\text{тд}}$) з частинками розміром менше $0,1 \text{ мм}$.

Проводили дослідження впливу концентрації наповнювача та його гранулометричного складу на модуль пружності розроблених композитів (рис. 3).

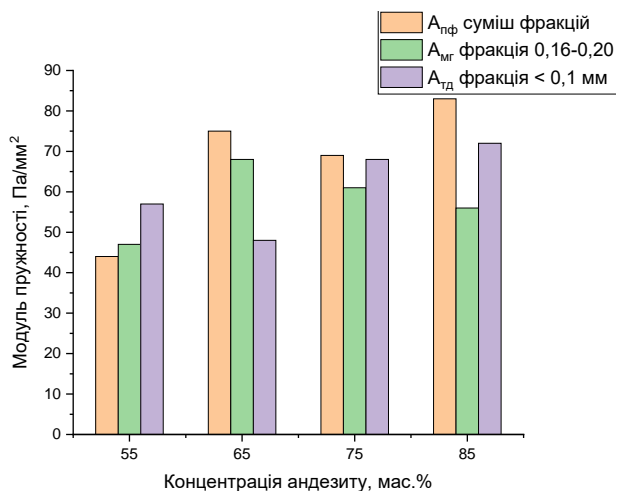


Рис. 3. Модуль пружності композитів залежно від концентрації андезиту для різних гранулометричних складів

Аналіз отриманих даних демонструє, що із збільшенням концентрації андезиту від 55% до 85% спостерігається зміна модуля пружності композитів, причому ступінь впливу залежить від розміру частинок наповнювача.

Отже, на основі аналізу (рис. 3) можна зробити висновок, що суміш фракцій андезиту ($A_{\text{суміш фракцій}}$) при високій концентрації (85%) є найбільш ефективною для досягнення максимального модуля пружності в композитах. Водночас тонкодисперсна фракція ($A_{\text{тд}}$) забезпечує високу міцність при середніх концентраціях (65% та 75%). Крупнодисперсна монофракція ($A_{\text{мг}}$) виявляється менш ефективною у порівнянні з іншими фракціями, що може бути пов'язано з меншою площею взаємодії наповнювача з полімерною матрицею.

Аналіз отриманих результатів модуля пружності дозволяє детальніше вивчити вплив гранулометричного складу та концентрації андезиту на фізико-механічні властивості полімерних композитів. Попередні результати показали, що суміш фракцій андезиту при високій концентрації забезпечує максимальний модуль пружності, тоді як тонкодисперсна фракція сприяє підвищенню механічної міцності при середніх концентраціях. Тепер важливо звернути увагу на інші властивості композитів, такі як щільність, водопоглинання, пористість та стійкість до стирання, які впливають на загальну стійкість і довговічність матеріалу.

Дані, наведені в таблиці 1, ілюструють зміну фізико-механічних параметрів композитів залежно від типу наповнювача, концентрації андезиту та гранулометричного складу. Зокрема, при збільшенні концентрації андезиту від 55 до 85 мас.% можна відзначити зменшення щільності матеріалу, що спостерігається для всіх типів фракцій.

Водночас водопоглинання матеріалів зменшується зі збільшенням концентрації наповнювача, що може бути пов'язано з меншою проникністю для води через ущільнення структури композиту при високих концентраціях. Винятком є крупнодисперсна фракція, яка демонструє найвищі показники водопоглинання, що може вказувати на підвищену пористість матеріалу з великими частинками наповнювача та їх гірше упакування в композиті.

Щодо пористості, загальна пористість має тенденцію до зменшення з підвищенням концен-

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості композитів

Наповнювач	Концентрація, %	Густина, г/см ³	Водопоглинання за 24 год, %	Пористість загальна, %	Пористість відкрита, %	Стираність, г/см ²	Модуль пружності, Па/мм ²
Андезит $A_{\text{суміш фракцій}}$	55	1,33	8,82	11,75	8,82	0,01	44
	65	1,53	5,1	8,06	4,44	0,008	75
	75	1,62	2,72	4,40	2,72	0,008	69
	85	1,23	2,14	4,0	2,43	0,018	83
Андезит $A_{\text{мг}}$ фракція 1-2 мм	55	1,42	2,71	3,85	2,70	0,04	47
	65	1,42	5,38	7,67	5,38	0,010	68
	75	1,61	2,18	3,51	2,18	0,010	61
	85	1,77	1,81	3,2	5,38	0,026	56
Андезит $A_{\text{тд}}$ фракція < 0,5 мм	55	1,43	5,58	7,76	5,41	0,005	57
	65	1,54	4,32	6,66	4,82	0,006	48
	75	2,21	3,28	7,23	3,28	0,015	68
	85	1,85	1,83	3,39	1,83	0,044	72

трації наповнювача, особливо для тонкодисперсної фракції. Відкрита пористість знижується для суміші фракцій, що сприяє підвищенню щільності та зменшенню водопоглинання, роблячи цей матеріал більш стійким до впливу вологи. Водночас крупнодисперсна фракція зберігає вищий рівень відкритої пористості, що підтверджує її менш компактну структуру.

Стіранність композитів залишається низькою при високих концентраціях андезиту, що є важливим показником для матеріалів, які використовуються в умовах підвищеного тертя. Найвищі показники стірання спостерігаються для суміші фракцій при концентрації 85 мас.%, що вказує на високу зносостійкість цього матеріалу.

Отже, виходячи з одержаних даних, можна стверджувати, що змішаний гранулометричний склад ($A_{\text{нф}}$) і високі концентрації андезиту забезпечують найкращі показники механічної міцності, низьку пористість і високу стійкість до стірання, роблячи такі композити перспективними для застосування в умовах підвищених механічних навантажень. Отримані результати можуть бути корисними для розробки екологічно безпечних і економічно вигідних композитів, зокрема для будівництва та інших галузей промисловості, де необхідні матеріали з високою стійкістю до механічних навантажень.

Висновки.

1. При визначенні впливу гранулометричного складу на властивості композиту встановлено, що

суміш фракцій андезиту ($A_{\text{нф}}$) показала найкращі результати щодо модуля пружності та стійкості до стірання, особливо при високій концентрації наповнювача 85 мас.%. Це свідчить про переваги змішаного гранулометричного складу для рівномірного розподілу наповнювача в полімерній матриці, що сприяє підвищенню міцності та зносостійкості композиту.

2. Встановлено, що зі збільшенням концентрації андезиту зменшується загальна пористість і водопоглинання композиту, що позитивно впливає на його щільність і стійкість до дії води. Найбільші показники модуля пружності досягаються при високих концентраціях 85 мас.%, що робить такі композити перспективними для застосування в умовах підвищених навантажень.

3. Висока концентрація тонкодисперсної фракції ($< 0,1$ мм) зменшує водопоглинання та підвищує щільність матеріалу завдяки кращій упакованості частинок наповнювача і збільшеній площі поверхні для взаємодії з полімерною матрицею.

4. Найнижчі показники стіраності отримані для композитів із сумішню фракцій при концентрації 85 мас.%, що вказує на їх високу зносостійкість і підходить для матеріалів, що експлуатуються в умовах тертя.

5. Суміш фракцій андезиту при концентрації 85 мас.% є оптимальним варіантом для отримання композитів з високим модулем пружності, низькою пористістю, незначною стіраністю та хорошою стійкістю до вологи.

Список літератури:

1. Курта С.А. Наповнювачі – синтез, властивості та використання : навчальний посібник. Івано-Франківськ : Вид-во Прикарпат. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. 2012. 296 с.
2. Сапронов О.О., Нігалатій В.Д., Клевцов К.М., Смирнов І.В. Вплив вмісту і природи дрібнодисперсного наповнювача на механічні властивості і структуру полімерних захисних покриттів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. № 2 (9). С. 229-237.
3. Özkan Ş., Ceylan H. The effects on mechanical properties of sustainable use of waste andesite dust as a partial substitution of cement in cementitious composites. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 104959. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104959>.
4. Білоусов О.Ю., Черняк Л.П., Шнирук О.М. Пориста кераміка на основі відсівів андезиту. *Modern scientific researches*. 2020. 12(1). P. 12-17. <https://doi.org/10.30889/2523-4692.2020-12-01-001>.
5. Çelikten S., Saridemir M., Sologlu M. Effects of elevated temperatures and cooling regimes on the waste andesite dust-based geopolymers mortars. *Construction and Building Materials*. 2024. 422. P. 135857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135857>
6. Шидловський М.С., Заховайко О.П., Тимошенко О.В., Мусієнко О. Практикум дослідження нових матеріалів. Частина 1. «Міцність і деформування полімерних та композиційних матеріалів при короткочасному навантаженні». К.: НТУУ «КПІ». 2017. 81 с.
7. Melnyk L. Formation of composite with variation of dispersity of filler and type of binder. *Technical sciences and technologies*. 2024. Vol. 1. №35. P. 198-203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-198-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-198-203).
8. Мельник Л.І., Черняк Л.П., Пахомова В.М., Шнирук О.М. Керамічний композит на основі вулканічних порід. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 2. С. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/10>.

9. Melnyk L.I., Cherniak L.P., Yevpak V.V. Composites based on fly ash with different polymer matrixes. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2. №1. P. 106-112. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18>

10. Мельник Л. Формування композиту при варіюванні дисперсності наповнювача та виду зв'язуючого. *Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка»*. 2024. – № 1(35). С. 198-203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-198-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-198-203).

11. Мельник Л.І., Свідерський В.А., Черняк Л.П. Особливості вулканічних порід як матеріалів для полімерних композитів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. 1(305). С. 14-19. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>.

Melnyk L.I., Sviderskyi V.A., Kolobovnikova Ye.A. GRANULOMETRIC COMPOSITION AND CONCENTRATION OF ANDESITE AS FACTORS INFLUENCING THE PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES

This article investigates the effect of the granulometric composition and concentration of andesite screenings on the physicomechanical properties of polymer composites based on the styrene-butadiene aqueous dispersion Latex 2012. Composites with mineral fillers are widely used in industry due to their ability to enhance strength, wear resistance, and other performance characteristics. One promising filler is andesite, which, due to its crystalline structure and high hardness, can significantly improve the quality of polymer composites. However, the optimal properties of composites can only be achieved with the correct selection of the filler's particle size distribution and concentration.

In this study, three types of andesite fractions were used: a mixture of fractions (Apf), a coarse monofraction (Amg) with particle sizes of 0.16–0.20 mm, and a fine fraction (Atd) with particle sizes less than 0.1 mm. The filler concentration varied from 55 to 85 wt.%. The experimental results showed that the mixture of andesite fractions at a concentration of 85 wt.% provided maximum modulus of elasticity and wear resistance in the composite, explained by the uniform distribution of particles of various sizes, creating a strong interfacial zone. Meanwhile, the fine fraction at concentrations of 65 and 75 wt.% demonstrated high density and reduced water absorption, which are important factors for ensuring material durability.

It was also found that as the andesite concentration increased, the total porosity of the composites decreased, reducing their permeability to moisture and enhancing resistance to environmental factors. The open porosity and water absorption were the lowest in samples with the fine filler fraction, indicating a denser composite structure. Wear rates also remained low at high andesite concentrations, ensuring the durability of the composite under conditions of mechanical friction.

Thus, this study confirmed that the use of andesite as a filler can significantly improve the operational properties of polymer composites. Selecting the optimal particle size distribution and filler concentration provides high strength, low porosity, and wear resistance, making these materials promising for applications in construction, mechanical engineering, and other industries.

Key words: composite, filler, andesite, latex, granulometric composition, modulus of elasticity, concentration, porosity.

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/34>**Савіцький Д.О.**

КЗ «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

Кириленко М.І.

КЗ «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

Майзеліс А.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ПОРІВНЯННЯ СТІЙКОСТІ ДО ДЕГРАДАЦІЇ ОДНОШАРОВОГО І МУЛЬТИШАРОВОГО ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ ZN-NI-CU

В статті показано, що одним із основних напрямків досліджень у галузі «зеленої» енергетики є синтез електрокаталізаторів на основі нікелю з підвищеною каталітичною активністю і розвинутою поверхнею, стійких до деградації при тривалій експлуатації. Стаття присвячена дослідженню стійкості до деградації електродів із вуглецевої сталі з покриттями на основі сплавів Zn-Ni-Cu, що осажені з аміакатно-гліцинатного електроліту. Розглянуто зміну каталітичних, корозійних і експлуатаційних властивостей одношарового і мультишарового покриттів як каталітично активних в реакції виділення водню в умовах прискорених випробувань, що моделюють змінне навантаження при лужному електролізі води. Використано лінійна і циклічна вольтамперометрія, потенціостатичний і двоімпульсний потенціостатичний методи електрохімічних досліджень і осаження покриттів, рентгенофлуорисцентний метод визначення складу сплаву. Визначено, що мультишарове покриття, в порівнянні з одношаровим, більш збагачене нікелем і міддю, його густина струму корозії у розчині луку у 1,4 рази менший, а струм обміну реакції виділення водню на його поверхні більший в 11,4 рази. З'ясовано, що, при циклуванні електродів в діапазоні потенціалів виділення водню, на мультишаровому електроді зменшується перенапруга виділення водню, на відміну від одношарового електроду, поверхня якого модифікується в таких умовах зі збільшенням перенапруги виділення водню за рахунок блокування поверхні бульбашками водню. За час прискорених випробувань виявлено часткове знецинкування поверхні електродів, наслідком чого є зниження приблизно у 1,7 рази густини струму корозії обох електродів та збільшення струму обміну реакції виділення водню. Показано, що перенапруга виділення водню на електроді з мультишаровим покриттям при густині струму 10 mA/cm^2 , в порівнянні з одношаровим, менша на 19 мВ, при густині струму 100 mA/cm^2 – на 14 мВ.

Ключові слова: сплав Ni-Zn-Cu, корозійна стійкість, мультишарове покриття, виділення водню, густина струму обміну.

Постановка проблеми. Лужний варіант електролізу води дозволяє використовувати широкий асортимент електродних матеріалів, корозійно-стійких у даному середовищі. Для підвищення ефективності електролізу необхідне зниження перенапруги реакції виділення водню (РВВ), підвищення експлуатаційних властивостей електродів. Основна стратегія зниження перенапруги РВВ – підвищення каталітичної активності електродних матеріалів, збільшення активної площі поверхні, підвищення електропровідності та покращення транспорту газових бульбашок. Підвищення цих характеристик відмічають на нанопористих гідрофільних поверхнях [1]. Однак сама по собі активність каталізатора в реакції виділення водню не достатня для застосування в промис-

лових масштабах. Вкрай важливим параметром електроду з каталітично-активним покриттям є його довготривала стабільність [2]. Звичайними причинами деградації електродів є зменшення активної поверхні, що викликане нестабільністю розвинутої структури каталізатора та покриванням поверхні отрутами та бульбашками [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одним з основних напрямків досліджень в галузі «зеленої» енергетики став синтез електрокаталізаторів на основі нікелю [4]. Як електродний матеріал розглядаються і сплави системи Ni-Zn-Cu: Cu-Ni [5], Cu-Zn [6], Ni-Zn [7], Zn-Ni-Cu [8] як у вихідному стані, так й для отримання матеріалів типу нікелю-Ренея. Для збільшення площі електродів все більш активно використовуються

електрохімічні методи отримання 3Д-структур, в тому числі і мультишарові покриття [9]. Як нано-, так й мікро/мезо-рівень їх структурування передбачає чутливість до деградації активної поверхні. Стійкість до деградації визначаються аналізуючи наслідки тривалого потенціостатичного електролізу [10, 11], гальваностатичної [5, 7, 12], а також ступінчатої [5] та мульти-циклічної [5, 6, 10, 11, 13-15] зміни навантаження. Тому актуальні дослідження, що спрямовані на отримання нових дешевих матеріалів з підвищеною каталітичною активністю і розвиненою поверхнею, до того ж стійких при тривалій експлуатації.

Постановка завдання. Метою досліджень було порівняння каталітичних, корозійних і експлуатаційних властивостей мультишарового покриття з властивостями одношарового покриття на основі сплавів Zn-Ni-Cu в умовах прискорених випробувань в якості електродного матеріалу в реакції виділення водню.

Виклад основного матеріалу. Методика. Покриття на основі сплавів Zn-Ni-Cu осаджували на зразки із вуглецевої сталі марки Ст.3 робочою площею 2,25 см² з електроліту складу, моль/дм³: Zn²⁺ – 0,075; Ni²⁺ – 0,175; Cu²⁺ – 0,010; гліцину – 0,46; NH₄⁺ – 1,66; рН 8,5. Сталеву поверхню перед осадженням зачищали карбід силіконовим папером абразивністю від 1000, 2000 та 3000 grit. Визначення швидкості корозії покриттів поляризаційним методом та тестування електродів на деградацію циклуванням в області потенціалів виділення водню проводили у розчині гідроксиду натрію концентрацією 1,0 моль/дм³, без компенсації омичних втрат. Осадження покриттів та їх тестування проводили з використанням потенціостату MTech SPG-500fast у триелектродній комірці. Лінійні та циклічні поляризаційні залеж-

ності отримали зі швидкістю розгортання потенціалу 1 мВ/с. Допоміжний електрод – пластина з платини, електрод порівняння – хлорид-срібний. Струм корозії ($i_{кор}$) визначали за формулою

$$i_{кор} = \frac{b_a b_k}{2,303 R_n (b_a + b_k)},$$

де b_k і b_a – коефіцієнти Тафеля катодної та анодної поляризаційних залежностей, відповідно, мВ; R_n – поляризаційний опір, Ом·см². Струм обміну реакції виділення водню (j_0) визначали за формулою, $j = 10^{-ab}$ де a і b – коефіцієнти Тафеля поляризаційної залежності виділення водню. Елементний склад покриттів визначали з використанням рентгенофлуорисцентного спектрометра СПРУТ (XRF).

Результати досліджень. Хронопотенціограми і хроноамперограми осадження покриттів сплавами Zn-Ni-Cu з аміакатно-гліцинатного електроліту наведено на рис. 1. Одношарове покриття «ОШ» осаджували в потенціостатичному режимі при потенціалі –1,2 В, мультишарове покриття «МШ» – двоімпульсним методом, шляхом чергування завдання значень потенціалу –1,1 В та –1,3 В (рис. 1а). Осадження кожного шару мультишарового покриття (кр. 1 рис. 1б) при потенціалі –1,1 В супроводжується збільшенням величини струму за рахунок збільшення площі поверхні кристалів. У процесі осадження кожного шару сплаву при –1,3 В струм зменшується, що може бути пояснене обмеженням доставки іонів металів до поверхні електрода при суттєво більшій густині струму. При цьому загалом, напротязі осадження покриття, струм осадження збільшується, що пов'язано зі збільшенням реальної площі поверхні електрода.

Режим осадження покриттів та їх склад, визначений рентгенофлуоресцентним методом, наведе-

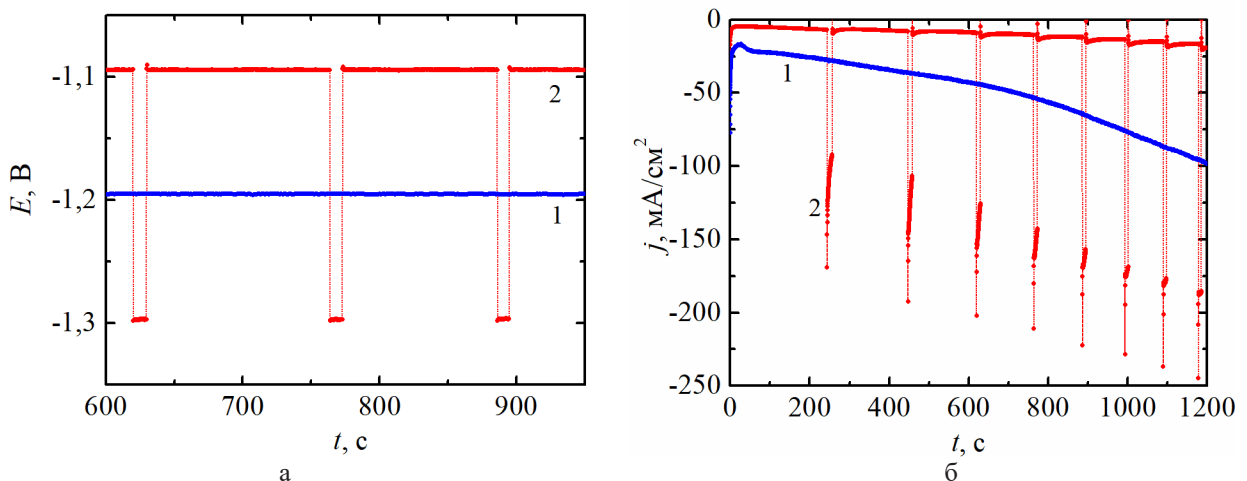


Рис. 1. Хронопотенціограми (а) і хроноамперограми (б) осадження одношарового «ОШ» (1) і мультишарового «МШ» (2) покриття в аміакатно-гліцинатному електроліті

дено у табл. 1. Мультишарове покриття більш збагачене за нікелем і міддю.

Саме через такий елементний склад покриттів стаціонарний потенціал мультишарового покриття у 1 моль/дм³ розчині NaOH, який використовують в електролізерах для отримання водню, є більш позитивним (рис. 2а).

Таблиця 1

Характеристика покриттів

Параметр	Покриття		
	«ОШ»	«МШ»	
Режим осадження покриттів	-1,2 В	[(-1,1 В; 0,6 Кл/см ²)/(-1,3В; 0,6 Кл/см ²)] _n	
Вміст металів в вихідному покритті, мас. %	Zn	64,5	54,3
	Ni	19,6	25,6
	Cu	15,9	20,1
Вміст металів в покритті після циклування, мас. %	Zn	33,0	27,4
	Ni	40,0	41,6
	Cu	27,0	31,0

Корозійні діаграми обох електродів наведено на рис. 2б, розраховані за ними параметри корозії – у табл. 2. При однаковому поляризаційному опорі, 65 Ом·см², струм корозії мультишарового покриття у розчині лугу у 1,4 рази менший, тобто швидкість корозійного руйнування мультишарового покриття у 1,4 нижча, ніж одношарового.

Для визначення стійкості електродів в умовах електролізу з перемінним навантаженням, проводили їх циклування в діапазоні потенціалів виділення водню, що відповідає широкому діапазону густин струму, від 0 мА/см² до 150 мА/см². ЦВА в 1 моль/дм³ розчині гідроксиду натрію наведено на рис. 3. Слід зазначити, що згодом (зі збільшенням кількості циклів) ЦВА на одношаровому електроді зміщуються у бік більш негативних значень (рис. 3а), а на мультишаровому електроді – у бік більш позитивних (рис. 3б). Така різниця може бути пов'язана з різним характером зміни фазового складу покриття і площі поверхні, а також і з різною морфологією поверхні [16]. Як свідчать дані табл. 1, при відносно однаковому зменшенні після циклування в складі цинку, приблизно вдвічі, в мультишаровому покритті майже не змінилося співвідношення вмісту міді і нікелю (лише на 5 %), тоді як в одношаровому це співвідношення змінилося на 16,8 %, що свідчить про розчинення з нього не тільки цинку, але і мідь-вмісної фази.

На рис. 4а наведено катодні поляризаційні залежності виділення водню на одношаровому (кр. 1, 1') і мультишаровому (2, 2') електродах до (1, 2) і після (1', 2') циклування у розчині лугу. Слід зазначити, що на відміну від поведінки електродів при тривалому циклуванні, за результатами

Таблиця 2

Параметри корозії сталевих електродів з покриттями

Параметр корозії	До циклування		Після циклування	
	«ОШ»	«МШ»	«ОШ»	«МШ»
Потенціал корозії $E_{кор}$, мВ	-1087	-1019	-974	-945
Поляризаційний опір R_p , Ом·см ²	65	65	59	160
Коефіцієнт Тафеля b_a , мВ	42	28	19	47
Коефіцієнт Тафеля b_k , мВ	51	39	33	50
Густина струму корозії $i_{кор}$, мкА/см ²	154	110	87	66

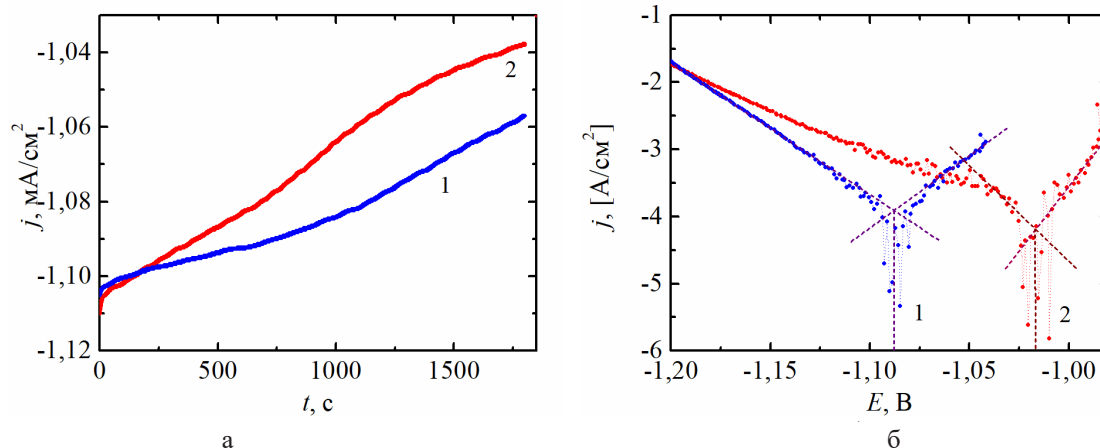


Рис. 2. Стаціонарні потенціали (а) і корозійні діаграми (б) одношарового (1) і мультишарового (2) покриттів

поляризаційних залежностей активність обох електродів збільшилася внаслідок розчинення цинку з відповідним збільшенням площі поверхні і зменшенням цинку в складі покриття.

Це дозволяє припустити, що поверхня мультишарового покриття більшою мірою сприяє відриву бульбашок водню: в умовах тривалого циклування, на відміну від умов отримання однієї поляризаційної залежності, на поверхні одношарового покриття здійснювалося накопичення водню і екранування поверхні з відповідним зміщенням ЦВА в бік негативних значень потенціалу, тоді як на поверхні мультишарового покриття такого накопичення не спостерігалось і більшою мірою виявляється ефект знецинкування.

Результати аналізу цих залежностей у напівлогарифмічних координатах Тафеля (рис. 4б) наведено в табл. 3. Струм обміну реакції виділення водню на мультишаровому електроді в 11,4 рази перевищує струм обміну на одношаровому електроді, а перенапряга виділення водню при 10 мА/см² менша на 7 мВ і при 100 мА/см² – на 14 мВ.

Після циклування електродів у лужному середовищі коефіцієнти Тафеля у одношарового електрода збільшуються, у мультишарового – зменшуються, що також відображає різницю в характері зміни площі і складу покриттів за час електролізу. Значення струму обміну обох електродів зближуються. Але різниця в значеннях перенапрузі виділення водню значно збільшується. Це пов'язано зі зближенням складу поверхні електродів та з більшим розвиненням поверхні мультишарового електрода, яка більшою мірою сприяє відриву бульбашок водню.

Таблиця 3

Кінетичні параметри реакції виділення водню

Кінетичний параметр	До циклування		Після циклування	
	«ОШ»	«МШ»	«ОШ»	«МШ»
a , мВ	-279	-337	-303	-275
b , мВ	56	86	74	70
i_0 , мкА/см ²	10	114	81	117
$\Delta E(10 \text{ мА/см}^2)$, мВ	-172	-165	-153	-134
$\Delta E(100 \text{ мА/см}^2)$, мВ	-311	-297	-255	-241

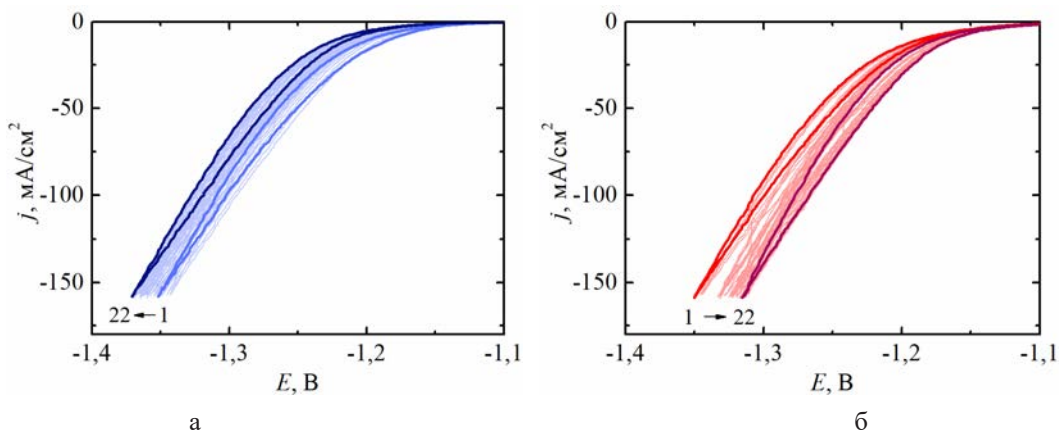


Рис. 3. Циклічні вольтамперограми у 1 моль/дм³ розчині КОН на сталевих електродах з одношаровим (а) і мультишаровим (б) покриттями. Швидкість розгортки потенціалу 1 мВ

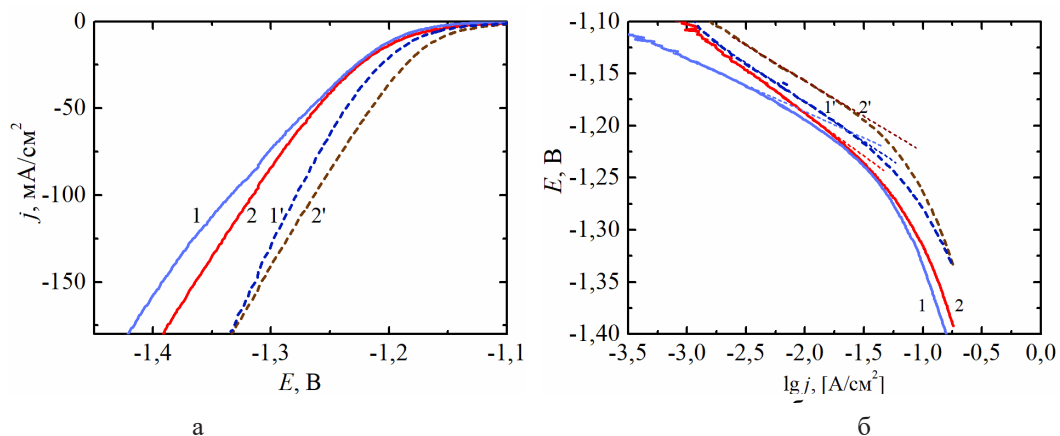


Рис. 4. Катодні поляризаційні залежності виділення водню (а), відповідні (б) тафелівські залежності на одношаровому (1, 1') і мультишаровому (2, 2') електродах до (1, 2) і після (1', 2') циклування

Слід зазначити, що, на відміну від деградації електродів з покриттями подвійними сплавами системи Zn-Ni-Cu в умовах мульти-циклування [5, 6, 10, 14], покращення властивостей після тривалого електролізу спостерігалось також у випадку покриття потрійним сплавом [11],

Висновки. Мультишарове покриття на основі сплавів Zn-Ni-Cu, осаджене двоімпульсним потенціостатичним методом, в порівнянні з одношаровим, більш збагачене нікелем і міддю, його струм корозії у розчині лугу у 1,4 рази менший, а струм обміну реакції виділення водню на його поверхні більший в 11,4 рази, з меншою на 7 мВ перенапругою виділення водню при густині струму 10 мА/см² і на 14 мВ – при 100 мА/см².

Дослідження стійкості покриттів на основі сплавів Zn-Ni-Cu до деградації в умовах періодичної зміни навантаження при виділенні водню у лужному середовищі виявило, що при циклуванні електроду в діапазоні потенціалів виділення водню на мультишаровому електроді зменшується перенапруга виділення водню, на відміну від одношарового електроду, поверхня якого модифікується в таких умовах зі збільшенням утруднень виділення водню за рахунок блокування поверхні бульбашками водню.

Визначено, що протягом прискорених випробувань на швидкість деградації відбувається часткове знецинкування поверхні електродів, а у випадку одношарового покриття розчиняється ще й мідь вмісна фаза; значення струму корозії обох електродів знижуються приблизно у 1,7 рази, а струм обміну обох електродів збільшується; різниця в значеннях перенапруги виділення водню збільшується (перенапруга виділення водню при 10 мА/см² стає меншою на 19 мВ і при 100 мА/см² – на 14 мВ). Перевага мультишарового покриття пов'язана як з більш суттєвим збільшенням площі поверхні за рахунок вилугування цинку, так і з посиленням його каталітичної активності за рахунок іншої зміни фазового складу поверхневого шару покриття.

Таким чином, виявлено, що за час прискорених випробувань покриття на основі сплавів Zn-Ni-Cu зазнали зміни, які пов'язані зі зміною складу і морфології покриття, але ці зміни, на відміну від подвійних сплавів, покращили їх властивості в якості електродного матеріалу для виділення водню, причому більшою мірою – у випадку мультишарового покриття. Однак за час випробувань ще не було досягнуто стабільних параметрів, тому доцільно провести більш тривалі, ніж загальноприйняті у літературних джерелах, дослідження.

Список літератури:

1. Yuan Rao, Yang Wang, Hui Ning, Peng Li, Mingbo Wu. Hydrotalcite-like Ni(OH)₂ nanosheets in situ grown on nickel foam for overall water splitting. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8. No. 49. P. 33601-33607.
2. Shasha Tao, Florent Yang, Jona Schuch, Wolfram Jaegermann, Bernhard Kaiser. +Electrodeposition of nickel nanoparticles for the alkaline hydrogen evolution reaction: correlating electrocatalytic behavior and chemical composition. *ChemSusChem*. 2018. Vol. 11, No. 5. P. 948-958.
3. Malik B., Anantharaj S., Karthick K., Pattanayak D.K., Kundu S. Magnetic CoPt nanoparticle-decorated ultrathin Co(OH)₂ nanosheets: an efficient bi-functional water splitting catalyst. *Catalysis Science & Technology*. 2017. Vol. 7, No. 12. P. 2486-2497.
4. Cao Q., Shen Y., Bai J., Liu Q., Zhao Z., Lei T., Dhmees A.S., Zhang H. Mild formation of Ni (OH) 2 dense nanosheets array for ultra-efficient electrocatalytic hydrogen evolution. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 77. P. 15-22.
5. Mojabi S., Sanjabi S. Decorated fractal Ni-Cu foam with Pd nanoparticles as a high-performance electrocatalyst toward hydrogen evolution reaction. *Thin Solid Films*. 2022. Vol. 758. P. 139415.
6. Döşlü S.T., Döner A., Yıldız R. Electrocatalysis property of CuZn electrode with Pt and Ru decoration. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46(43). P. 22409-22421.
7. Ganci F., Buccheri B., Patella B., Cannata E., Aiello G., Mandin P., Inguanta R. Electrodeposited nickel-zinc alloy nanostructured electrodes for alkaline electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47(21). P. 11302-11315.
8. Ashassi-Sorkhabi H., Abolghasemi-Fakhri S., Moghadam B.R., Javan H. One step electrochemical route to the fabrication of highly ordered array of cylindrical nano porous structure and its electrocatalytic performance toward efficient hydrogen evolution. *Journal of colloid and interface science*. 2018. Vol. 515, P. 189-197.
9. Maizelis A. Electrochemical Formation of multilayer coatings: copper-nickel alloys and oxo-hydroxides: monograph. Lambert Academic Publishing, 2021. 173 p.
10. Zhao, Y., Wei, S., Xia, L., Pan, K., Zhang, B., Huang, Dong Z., Wu H.H., Lin J., Pang H. Sintered Ni metal as a matrix of robust self-supporting electrode for ultra-stable hydrogen evolution. *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 430. P. 133040.

11. Gao M.Y., Yang C., Zhang Q.B., Yu Y.W., Hua Y.X., Li Y., Dong P. Electrochemical fabrication of porous Ni-Cu alloy nanosheets with high catalytic activity for hydrogen evolution. *Electrochimica Acta*. 2016. Vol. 215. P. 609-616.
12. Solmaz R., Döner A., Kardaş G. Preparation, characterization and application of alkaline leached CuNiZn ternary coatings for long-term electrolysis in alkaline solution. *International journal of hydrogen energy*. 2010. Vol. 35(19), P. 10045-10049.
13. Elsharkawy S., Kutyla D., Marzec M.M., Zabinski P. Electrodeposition of hydrophobic Ni thin films from different baths under the influence of the magnetic field as electrocatalysts for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024. Vol. 61. P. 873-882.
14. Liu W., Tan W., Yang Y., He H. One-step galvanostatic electrodeposition of Ni-Se-Dy film on Ni foam for hydrogen evolution reaction in alkaline solution. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 925. P. 166706.
15. Lotfi N., Farahani T.S., Yaghoubinezhad Y., Darband G.B. Simulation and characterization of hydrogen evolution reaction on porous NiCu electrode using surface response methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44(26). P. 13296-13309.
16. Maizelis A.A., Bairachniy B.I. Copper nucleation on nickel from pyrophosphate-based polyligand electrolyte. *Springer Proceedings in Physics*. 2018. Chapter 28. P. 443-457.

Savitskyi D.O., Kyrlyenko M.I., Maizelis A.O. COMPARISON OF THE RESISTANCE TO DEGRADATION OF SINGLE-LAYER AND MULTI-LAYER COATINGS BASED ON Zn-Ni-Cu ALLOYS

The article shows that one of the main areas of research in the field of "green" energy is the synthesis of nickel-based electrocatalysts with increased catalytic activity and a developed surface, resistant to degradation during long-term operation. The article is devoted to the study of the resistance to degradation of carbon steel electrodes with coatings based on Zn-Ni-Cu alloys deposited from an ammonia-glycinate electrolyte. The change in catalytic, corrosion and operational properties of single-layer and multilayer coatings as catalytically active in the hydrogen evolution reaction under accelerated test conditions simulating variable load during alkaline electrolysis of water is considered. Linear and cyclic voltammetry, potentiostatic and two-pulse potentiostatic methods of electrochemical studies and deposition of coatings, and X-ray fluorescence method for determining the alloy composition are used. It was determined that the multilayer coating, in comparison with the single-layer one, is more enriched with nickel and copper; its corrosion current in an alkali solution is 1.4 times lower; and the exchange current of the hydrogen evolution reaction on its surface is 11.4 times higher. It was found that, when cycling the electrodes in the range of hydrogen evolution potentials, the hydrogen evolution overvoltage decreases on the multilayer electrode, in contrast to the single-layer electrode, the surface of which is modified under such conditions with an increase in the overvoltage of hydrogen evolution due to the blocking of the surface by hydrogen bubbles. During accelerated tests, partial dezincification of the electrode surface was detected, which resulted in a decrease of approximately 1.7 times in the corrosion current of both electrodes and an increase in the exchange current of the hydrogen evolution reaction. It is shown that the overvoltage of hydrogen evolution on an electrode with a multilayer coating at a current density of 10 mA/cm², in comparison with a single-layer one, is lower by 19 mV, and at a current density of 100 mA/cm² it is lower by 14 mV. It is assumed that the advantage of a multilayer coating is associated with a more significant increase in the surface area and with an increase in its catalytic activity due to a different nature of the change in the phase composition of the surface layer of the coating during the tests, as well as with the promotion of conditions for the separation of hydrogen bubbles from the surface.

Key words: Ni-Zn-Cu alloy, corrosion resistance, multilayer coating, hydrogen evolution reaction, exchange current density.

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/35>**Семичаєвський С.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Несенюк Л.П.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ПРО ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ В МАШИНИХ ЗАЛАХ АТОМНИХ І ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті розкрито основні чинники, які впливають на пожежну небезпеку технологічного процесу в машинних залах атомних і теплових електростанцій.

З'ясовано, що наявність у системах охолодження турбогенераторів горючого і вибухонебезпечного водню у поєднанні з горючим маслом, температура самозаймання якого значно нижче, ніж у водню, складає проблему забезпечення вибухо- та пожежобезпеки в машзалах атомних і теплових електростанцій.

Розкрито основні принципи роботи та пожежну небезпеку газомасляної системи турбогенератора. Розглянуто принцип роботи ущільнень валу турбогенератора.

З'ясовано, що наявність надлишкового тиску водню повинно виключати потрапляння повітря всередину газомасляної системи турбогенератора і утворення вибухонебезпечної воднево-повітряної суміші всередині турбогенератора і в ємкостях на зливі з ущільнень масла, яке стикається з воднем.

Визначено нормативні показники складу газової суміші для уникнення появи вибухонебезпечної концентрації в корпусі турбогенератора.

Розглянуто номінальні значення надлишкового тиску водню в корпусі турбогенераторів, встановлених на атомних електростанціях.

Досліджено умови застосування водню в якості охолоджуючого середовища.

Розглянуто пожежонебезпечні зони машинного залу та відповідні джерела пожежі.

Розглянуто об'єми масла в маслосистемах турбіни і генератора та показники, що характеризують вибухопожежну небезпеку змащувальних рідин та водню.

Визначено технологічні параметри системи маслопостачання опорних підшипників турбогенераторів.

З'ясовано, що в машинних залах атомних і теплових електростанцій передбачена автоматична система водяного пожежогасіння та охолодження металоконструкцій. Встановлено параметри цієї системи.

Розглянуто процес охолодження металевих ферм даху машинного залу під час пожежі за допомогою лафетних стволів.

З'ясовано, що існуючий комплекс заходів щодо забезпечення пожежної безпеки в машинних залах атомних і теплових електростанцій має ряд суттєвих недоліків.

Розглянуто науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, направлені на підвищення вибухопожежонебезпечності генераторів і в цілому машзалів електростанцій.

Ключові слова: атомні і теплові електростанції, водень, масло, машинні зали, пожежна небезпека, турбогенератори.

Постановка завдання. Пожежі становлять потенційну небезпеку на більшості великих промислових об'єктів, у тому числі на атомних і теплових електростанціях (далі – АЕС і ТЕС).

Одним із найбільш пожежонебезпечних приміщень на АЕС і ТЕС є машинні зали, які являють собою одноповерхові будівлі і мають загальні компонувальні рішення і за висотою поділяються на два приміщення [1, 2]. В верх-

ньому приміщенні розміщують турбогенератори (далі – ТГ), в нижньому – конденсаційному встановлюють конденсатори, живильні, конденсатні, дренажні і інші насоси, регенеративні і мережеві підігрівачі тощо.

Під підлогою конденсаційного приміщення розміщують насоси і трубопроводи охолоджуючої води, електричні кабелі та інші лінії комунікацій.

Водень знаходиться зсередини циліндричного зварного корпусу ТГ, закритого торцевими щитами [1, 2].

Для попередження витоку водню у місцях виходу валу, що обертається, з торцевих щитів корпусу з обох сторін ТГ встановлені масляні ущільнення. «Запирання» водню в ущільненнях здійснюється зустрічним потоком турбінного масла в зазорі між вкладишем та валом. Тиск масла перевищує тиск водню, що і запобігає виходу водню через зазор між вкладишем і валом. Для підведення масла в ущільнення і зливання його передбачається система маслопостачання. Для заповнення ТГ воднем і підтримання заданого надлишкового тиску зсередини корпусу застосовується відповідне обладнання, що утворює газову систему ТГ. Комплекс – корпус ТГ, вузли ущільнень, обладнання газової системи і системи маслопостачання – складає газомасляну систему [1, 2].

Наявність у системах охолодження ТГ горючого і вибухонебезпечного водню у поєднанні з горючим маслом, температура самозаймання якого значно нижче, ніж у водню, власне і складає проблему забезпечення вибухо- та пожежобезпеки в машзалах АЕС і ТЕС.

Досвід експлуатації показує, що на електростанціях трапляються великі аварії з катастрофічними наслідками – пожежами, суттєвими пошкодженнями і (або) руйнуванням ТГ і будівельних конструкцій машинних залів внаслідок пошкодження ТГ і горіння водню і масла [3, 4].

Враховуючи вищенаведене, проблема забезпечення пожежної безпеки машинних залів АЕС і ТЕС є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікація [3] присвячена аналізу недоліків наявних систем пожежогасіння на енергетичних об'єктах. Також наведено конкретні випадки відмов систем пожежогасіння в машинних залах АЕС.

У публікації [4] досліджено сценарії можливих пожеж в машинних залах атомних і теплових електростанцій.

У роботі [5] проаналізовано причини виникнення можливих пожеж в машинних залах АЕС і ТЕС.

У технічному звіті Управління науково-технічної інформації Міністерства енергетики США [6] описано систему спринклерного пожежогасіння для захисту типових великих турбогенераторних установок.

В той же час, у вищевказаних роботах не досліджено актуальне питання пожежної небезпеки технологічного процесу в машинних залах АЕС і ТЕС.

Постановка завдання. З метою вирішення вказаної проблеми у цій публікації необхідно встановити основні чинники, які впливають на пожежну небезпеку технологічного процесу в машинних залах АЕС і ТЕС.

Виклад основного матеріалу. Аналіз пожежної небезпеки технологічного процесу в машинних залах АЕС і ТЕС.

В машинних залах АЕС і ТЕС в Україні і за кордоном експлуатуються ТГ з водневим і водневоводяним охолодженням різної потужності – від 25 до 1200 МВт з надлишковим тиском водню в корпусі – від 0,05 до 0,5 МПа [4]. ТГ представляють собою синхронні генератори, основною функцією яких є конвертація механічної енергії парової чи газової турбіни в електричну при високих швидкостях обертання ротору (3000, 1500 об/хв).

На рисунку 1 представлено загальний вид машинного залу енергетичного підприємства.

Для попередження витоку водню у місцях виходу валу, що обертається з торцевих щитів корпусу з обох сторін ТГ встановлені масляні ущільнення. «Запирання» водню в ущільненнях здійснюється зустрічним потоком турбінного масла в зазорі між вкладишем і валом. Для підведення



Рис. 1. Загальний вид машинного залу енергетичного підприємства

масла в ущільнення і зливання його передбачається система маслопостачання. Для заповнення ТГ воднем і підтримання заданого надлишкового тиску зсередини корпусу використовується відповідне обладнання, яке утворює газову систему ТГ.

Комплекс – корпус ТГ, вузли ущільнень, обладнання газової системи і системи маслопостачання – складає газомасляну систему ТГ.

У таблиці 1 представлені номінальні значення надлишкового тиску водню в корпусі ТГ, встановлених на АЕС.

Таблиця 1

Номінальні значення надлишкового тиску водню в корпусі ТГ, встановлених на АЕС

Тип турбогенератора	Потужність, МВт	Надлишковий тиск водню, МПа
ТВВ-220-2А	220	0,3
ТВВ-500-2У3	500	0,45
ТВВ-1000-4У3	1000	0,5
ТВВ-1000-2У3	1000	0,5

Застосовуються два основних типи масляних ущільнень валу: торцеві і кільцеві.

Загальний принцип роботи ущільнень валу полягає в тому, що у вузькому зазорі між нерухомим вкладишем ущільнення, який має бабітову заливку, і валом, що обертається утворюється безперервний ущільнюючий потік масла, зустрічний по відношенню до водню. Тиск масла перевищує тиск водню, зазвичай перепад тисків масла і водню складає від 0,04 до 0,09 МПа, що і запобігає виходу водню через зазор між вкладишем і валом. Інший потік масла – в сторону повітря – забезпечує змазування і охолодження вкладиша, зливаючись в порожнину опорного підшипника або у повітряну зливну камеру.

Для підведення і зливання масла є система маслопостачання з насосами, маслоохолоджувачами, фільтрами, гідрозатворами, масляними баками і необхідною арматурою.

Порожнини зсередини ТГ, заповнені воднем при заданому надлишковому тиску, утворені корпусом ТГ, його торцевими щитами, ротором і ущільненнями валу. З цих порожнин водень потрапляє в зливні маслопроводи ущільнень, в гідрозатвор ЗГ-500, в трубу над демпферним баком, в верхню камеру регулятора перепаду тисків масла і водню. Поплавковий гідрозатвор ЗГ-500 «запирає» водень від виходу в зливний маслопровід підшипників і далі – в головний маслобак.

Додатковий захист від потрапляння водню в маслобак передбачений у вигляді петлевого затвора і гідравлічного затвора с експаустером.

Таким чином, як це видно з вищенаведених описів, наявність надлишкового тиску водню повинно виключати потрапляння повітря всередину газомасляної системи ТГ і, отже, утворення вибухонебезпечної воднево-повітряної суміші всередині ТГ і в ємкостях на зливі з ущільнень масла, яке стикається з воднем.

Однак всередину ТГ постійно вноситься повітря, розчинене в маслі (близько 10%), якщо масло не підлягає вакуумному очищенню. Це приводить до поступового зниження чистоти (концентрації) водню. Тому необхідний постійний контроль чистоти водню зсередини корпусу ТГ, яка повинна бути не нижче 98%. Щоб уникнути появи вибухонебезпечної суміші в корпусі ТГ і в ємкостях на зливі масла з ущільнень нормативні показники складу газової суміші встановлені з певним запасом: вміст кисню в корпусі ТГ в експлуатації не повинний перевищувати 1,2%, а в ємкостях на зливі масла в сторону водню – 2%.

Для відновлення необхідної чистоти водню регулярно (щодобово, а іноді і щозміни) проводяться продування ТГ чистим воднем, для чого частина водню випускається в атмосферу (зазвичай від 30 до 70 м³) через трубопровід Д_н50 з газового поста.

При нормальній роботі ТГ в корпусі повинний підтримуватися номінальний надлишковий тиск водню, за допомогою автоматичних регуляторів або вручну з періодичним підживленням воднем газового об'єму ТГ. В обох випадках коливання тиску в корпусі ТГ не повинні перевищувати ±0,02 МПа (при номінальному тиску 0,1 МПа і вище). Зниження тиску водню відбувається внаслідок витоків, причини яких розглянуті далі.

Безпечно заповнення корпусу ТГ воднем і заміна останнього повітрям здійснюється шляхом застосування в якості проміжного агенту інертного газу: водень витісняється інертним газом, потім інертний газ витісняється повітрям; повітря аналогічно витісняється інертним газом, потім інертний газ витісняється воднем. Необхідні для цих операцій обладнання і трубопроводи передбачені газовою схемою.

Застосування водню в якості охолоджуючого середовища обумовлено наступним:

- підвищення одиничної потужності турбогенераторів за рахунок збільшення їх габаритів неможливо внаслідок обмежень граничних механічних навантажень на елементи ротора;

- для подальшого підвищення потужності необхідно підвищення щільності струму в обмотках і інтенсифікація охолодження;

– для інтенсифікації охолодження необхідно використання більш ефективного охолоджуючого агента, яким є водень, теплопровідність якого в 6–7 разів більше теплопровідності повітря;

– застосування водню забезпечує зменшення втрат на тертя ротору турбогенератора, що обертається, завдяки його значно меншій щільності у порівнянні з повітрям.

Таким чином, в даний час система водневого охолодження є єдиною можливою системою охолодження для турбогенераторів великої потужності.

Приміщення машинного залу від підвалу до покрівлі має наскрізні отвори, тобто машинний зал є єдиною пожежною зоною. Але можливо виділити пожежонебезпечні зони – частини машинного залу, в яких є наступні джерела пожежі [1, 2]:

– займисті матеріали – турбінне масло, водень;
– горючі матеріали електрообладнання – ізоляція кабелів, електродвигунів тощо.

В першій зоні, яка знаходиться між відмітками 0,0 і 25,0 по висоті, розташовано обладнання маслосистем турбіни і генератора, а також генератор, заповнений охолоджуючим його воднем. Значна в цій зоні протяжність маслопроводів і газопроводів.

Генератор, наприклад, типу ТВВ-1000–4УЗ (ТВВ-1000-2У3) заповнений воднем при надлишковому тиску 0,5 МПа; газовий об'єм генератора разом з газовою системою при атмосферному тиску складає 125 (133) м³. Температура холодного водню в генераторі не перевищує 40°C, а гарячого водню – 75°C.

Генератор має систему маслопостачання опорних підшипників, яка забезпечується маслососами змазування і систему маслопостачання ущільнення підшипників, яка забезпечується маслососами ущільнення.

Технологічні параметри цих систем мають наступні значення:

– витрата масла через два підшипника – 21,6 (24) л/с;
– витрата масла через два ущільнення – 5,8 л/с;
– температура холодного масла на вході в підшипники і ущільнення – від 35°C до 45°C, гарячого масла на злив – до 65°C.

До маслосистеми турбоустановки відносяться:

– обладнання системи змазування турбіни – масляний бак турбіни, маслоохолоджувачі турбіни, демпферний бак, насоси системи маслопостачання і регулювання турбіни; обладнання маслосистеми турбоживильного насосу – гідроаккумулятор, дренажний бак, маслососи, масло-

охолоджувач редуктора турбоживильного насосу, аварійний бак маслопостачання турбоживильного насосу;

– загальноблочне обладнання – бак протікань масла, бак доливної, маслоочисна установка, фільтр-прес, насоси для перекачування відпрацьованого турбінного масла і зливання масла з баку протікань, а також маслопостачання вентиляторів.

Об'єми масла в баках маслосистем турбоагрегату вказані в таблиці 2.

Таблиця 2

Об'єми масла в маслосистемах турбіни і генератора

Найменування обладнання	Кількість на блок	Об'єм масла, м ³	
		На один бак	Всього
Головний маслосистеми змазування і регулювання турбіни	1	127,0	127,0
Демпферний бак системи змазування турбіни	1	3,2	3,2
Демпферний бак маслосистеми ущільнення вала генератора	2	3,2	6,4
Бак брудного масла	1	2,5	2,5
Маслосистема турбоживильного насосу	2	1,5	3,0
Маслосистема конденсатних насосів 2 ступеня	3	1,0	3,0
Доливної бак турбіни	1	2,5	2,5
Бак збирання протікань масла	1	2,5	2,5
Разом:			150,1

Показники, що характеризують вибухопожежну небезпеку змащувальних рідин та водню наведені в таблиці 3.

Витоки водню можуть відбуватися через місця стиків (фланцевих з'єднань деталей), які ущільнюються зазвичай гумовими шнурками, гумовими прокладками і манжетами.

Витоки водню можливі через дефекти зварних швів корпусу і торцевих щитів, через струмопроводи і центральний отвір ротору, через проходки для провідників контролю, а також поза ТГ – з різних місць обладнання і арматури газомасляної системи.

Водень потрапляє в картери підшипників через ущільнення при певних дефектах ущільнень, і регуляторів перепаду тиску масла і водню, регуляторів тиску масла, що притиснює.

Проливання масла із займанням його на великій площі в цій зоні може приводити до потрапляння

Показники, що характеризують вибухопожежну небезпеку змащувальних рідин та водню

Показники, що характеризують вибухопожежну небезпеку	Змащувальні рідини		Газ в системі охолодження генератора – водень
	ТП-22	ОМТІ	
Температура спалаху, °С	180	240	-
Температура займання, °С	210-220	340-400	-
Температура самозаймання, °С	300-350	559	510
Область займання при його концентрації в % к об'єму повітря	-	-	4,12-75,00
Мінімальний вибухонебезпечний вміст водню в % к об'єму повітря	-	-	5,0
Мінімальна енергія запалення, МДж	-	-	0,02
Нормальна швидкість розповсюдження полум'я, м/с	-	-	2,7-3,1

масла, що горить в кабельні тунелі і розповсюдженню пожежі по кабельним трасам з горючою ізоляцією далеко від місця пожежі.

Займання масла і пожежа в цій зоні з наступним негайним зупиненням турбоагрегату може привести до ряду подій, які в свою чергу, можуть призвести до катастрофічного розвитку аварійної ситуації:

- неспадка стопорних клапанів турбіни;
- підвищення частоти обертання ротору;
- зниження тиску масла в напірному колекторі системи змазування підшипників;
- підвищення тиску в паровому просторі в будь-якому із конденсаторів турбіни;
- відключення будь-яких цирконасосів турбіни;
- осьовий зсув ротору турбіни;
- зниження перепаду тиску «масло-водень» і відповідно зниження рівня масла в будь-якому з демпферних баків системи ущільнень валу генератора;
- припинення протоку охолоджуючої води через статор генератора;
- недопустиме зниження витрати охолоджуючої води на газоохолоджувачі;
- зниження тиску масла в системі регулювання турбіни;
- невідповідність стопорних і регулювальних клапанів турбіни.

У другій зоні, яка знаходиться між відмітками 0,0 і 3,6 за висотою, розташована етажерка приміщень електротехнічних пристроїв: приміщення розподільних пристроїв власних потреб – РПВП 6 кВ та РПВП 0,4 кВ, приміщення щитів постійного струму, приміщення зборок засувок тощо. Пожежа в цих приміщеннях приводить до відмови електроживлення елементів і пристроїв машинної зали (механізмів власних потреб і арматури), відмова яких приводить до вищевказаних подій, які вимагають зупинення турбіни, а також до зник-

нення напруги на пристроях дистанційного і автоматичного управління або на контрольно-вимірювальних приборах.

В обох зазначених зонах є кабельні траси, в яких проходять силові і контрольні кабелі, що забезпечують електроживлення механізмів власних потреб і арматури, а також функції управління. Пожежа в кабельних трасах також приводить до тих же подій, що і при пожежі в приміщеннях електротехнічних пристроїв, а також до втрати функцій ряду систем автоматики і управління.

Розглянемо першу пожежонебезпечну зону, тобто машинна зала між рядами колон А-Б, де розташовано обладнання маслосистем турбіни і генератора, обладнання системи водневого охолодження генератора. Ці системи, як відомо, є основним джерелом виникнення пожеж в машинній залі.

В цій зоні заходи щодо запобігання проливу та розповсюдження масла включають таке:

- виконання маслопроводів з безшовних труб з мінімальною кількістю фланцевих з'єднань;
- застосування для труб з фланцевими з'єднаннями спеціальних захисних кожухів, які запобігають розбризкуванню і розливу масла при порушенні герметичності;
- встановлення під маслоснаповненим обладнанням, об'ємом більше 0,1 м³ піддонів;
- відведення протікань масла з піддонів через скидні трубопроводи в спеціальний маслбак у підвалі, звідки насосом направляється на регенерацію;
- аварійне зливання масла з маслобака турбіни в бак, який знаходиться за межами машинної зали тощо.

В машинній залі АЕС і ТЕС передбачена автоматична система водяного пожежогасіння та охолодження металоконструкцій, яка призначається для запобігання розповсюдження пожежі на

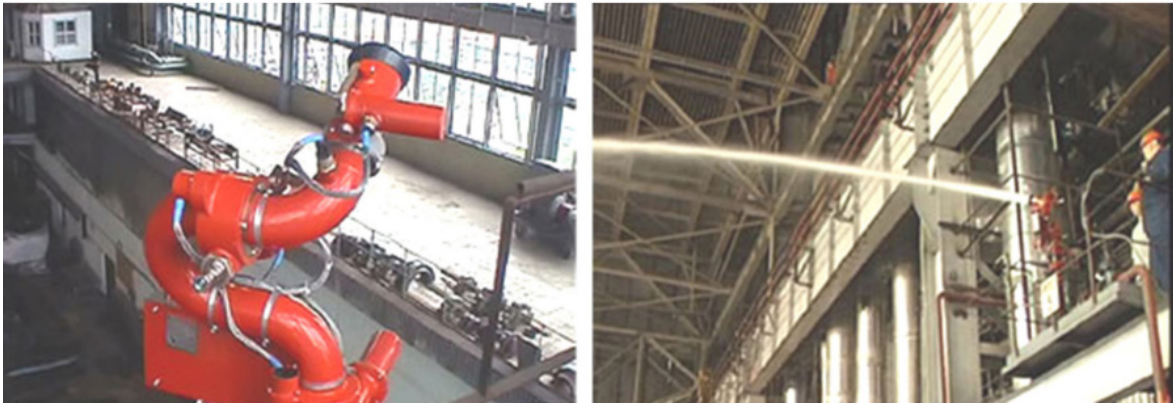


Рис. 2. Охолодження металевих ферм даху машинного за допомогою лафетних стволів

сусідні енергоблоки та інше енергетичне обладнання, для забезпечення гасіння пожежі в приміщеннях і на енергетичному обладнанні, а також для охолодження металевих конструкцій в машзалі. Найбільш небезпечні технологічні агрегати (турбогенератор, маслобаки тощо) безпосередньо захищені потужними водяними струменями.

Автоматична система пожежогасіння може бути загальною для усіх споруд і обладнання, які захищаються на енергетичному об'єкті в цілому, або автономною для ряду споруд.

Автоматичні системи пожежогасіння та автоматичні системи охолодження металоконструкцій забезпечуються автоматичним, дистанційним і місцевими пристроями запускання. Автоматичне запускання здійснюється від автоматичної пожежної сигналізації. Дистанційне запускання здійснюється з щитів управління та інших приміщень, де є постійний вартівний персонал. Ручне запускання і управління запірно-пусковими пристроями здійснюються з доступних і безпечних при пожежі місць.

Маслобаки турбогенераторів з нафтовим турбінним маслом згідно з обладнуються автоматичними системами водяного пожежогасіння з автоматичним, дистанційним та ручним приводом.

Кнопки дистанційного пуску та ручні приводи систем пожежогасіння та охолодження маслобаків фарбуються в червоний колір і мають написи «Відкривати при пожежі» і табличку «Маслобак №...».

Автоматичне пожежогасіння маслобаків турбогенераторів складається з розподільного трубопроводу, на якому встановлюються відповідні зрошувачі, постачальних трубопроводів, які з'єднують кільце з мережею протипожежного водогону, засувки з електричним приводом та спонукальної системи автоматичного спрацювання системи.

Витрати води на зрошення маслобаків турбогенераторів визначаються з урахуванням нормативної інтенсивності охолодження всієї поверхні, яка повинна бути не менш як $0,2 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$.

Водопостачання вказаних систем пожежогасіння здійснюється від кільцевої мережі протипожежного водопроводу турбінного відділення.

Крім того, передбачено охолодження металевих ферм даху під час пожежі за допомогою лафетних стволів, стаціонарно встановлених на відмітці обслуговування турбіни, як показано на рисунку 2. Стволи приєднані до кільцевої мережі протипожежного водопроводу турбінного відділення металевими трубами з запірною арматурою, розташованою у лафетного ствола.

У публікації [3] було з'ясовано, що існуючий що існуючий комплекс заходів щодо забезпечення пожежної безпеки в машинних залах АЕС (ТЕС) має ряд суттєвих недоліків.

Враховуючи вищенаведене, фахівцями науково-дослідних, проектних, налагоджувальних організацій і заводами-виготовлювачами України (наприклад, інститут Електродинаміки НАН України, АТ «Українські енергетичні машини» тощо) виконувались науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, направлені на підвищення вибухопожежонебезпеки генераторів і в цілому машзалів електростанцій, а саме [6]:

- розробка конструкцій генераторів, охолоджуючим середовищем яких є повітря або азот;
- використання інгібіторів в системі водневого охолодження генераторів для попередження вибуху і займання воднево-повітряної суміші;
- заміна нафтових турбінних масел на негорючі рідини в системах змазування, регулювання турбоагрегата, а також в схемі ущільнень вала генератора;
- захист металоконструкцій каркаса мазала вогнезахисними сумішами тощо.

Висновки.

1. Встановлено основні чинники, які впливають на пожежної небезпеку технологічного процесу в машинних залах АЕС і ТЕС.
2. Питання забезпечення пожежної безпеки машинних залів АЕС і ТЕС на теперішній час залишається актуальною та потребує проведення подальших досліджень.

Список літератури:

1. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Модернізація. Головний корпус. Турбінне відділення. Захід 29112. Розробити та реалізувати систему за сигналом «пожежа» скидання водню з корпусу генератора за межі машзалу. Етап 1. Технічні пропозиції. К., 2007. 25 с.
2. Технічні пропозиції щодо підвищення пожежної безпеки машзалів АЕС та стійкості їх будівельних конструкцій при пожежі. К., 1993. 13 с.
3. Семичаєвський С.В., Стилик І.Г., Свірський В.В., Алімов Б.О. Щодо пожежної небезпеки машинних залів енергетичних підприємств. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2021. Том 32 (71) № 6. С. 145-150.
4. Семичаєвський, С.В., Самченко Т.В. Дослідження сценаріїв можливих пожеж в машинних залах атомних і теплових електростанцій. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2023. Том 34 (73) № 2. С. 281-287.
5. Семичаєвський, С.В., Самченко Т.В. Аналіз причин можливих пожеж в машинних залах енергетичних підприємств. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2024. Том 35 (74) № 1. С. 56-62.
6. Turbine generator fire protection by sprinkler system. Final report / D.T. Hall, T.C. Clayton. Kansas City, MO (USA), 1985.

Semychayevsky S.V., Nesenyuk L.P. ON THE RESEARCH OF THE FIRE HAZARD OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS IN MACHINE ROOMS OF NUCLEAR AND THERMAL POWER PLANTS

The article reveals the main factors that affect the fire hazard of the technological process in the engine rooms of nuclear and thermal power plants.

It was found that the presence of flammable and explosive hydrogen in the cooling systems of turbogenerators in combination with flammable oil, the auto-ignition temperature of which is significantly lower than that of hydrogen, is a problem of ensuring explosion and fire safety in nuclear and thermal power plant halls.

The basic principles of operation and the fire hazard of the gas-oil system of the turbogenerator are disclosed. The principle of operation of turbogenerator shaft seals is considered.

It was found that the presence of excess hydrogen pressure should exclude the ingress of air into the gas-oil system of the turbogenerator and the formation of an explosive hydrogen-air mixture inside the turbogenerator and in the tanks on the drain from the seals of the oil that comes into contact with hydrogen.

The normative indicators of the composition of the gas mixture have been determined to avoid the appearance of explosive concentrations in the turbogenerator housing.

The nominal values of excess pressure of hydrogen in the case of turbogenerators installed at nuclear power plants are considered.

The conditions for using hydrogen as a cooling medium have been studied.

Fire-hazardous areas of the engine room and corresponding sources of fire were considered.

The volumes of oil in the oil systems of the turbine and generator and indicators characterizing the explosion and fire hazard of lubricating fluids and hydrogen are considered.

The technological parameters of the oil supply system of the support bearings of turbogenerators were determined.

It was found that in the engine rooms of nuclear and thermal power plants, an automatic system of water fire extinguishing and cooling of metal structures is provided. The parameters of this system are set.

The process of cooling the metal trusses of the engine room roof during a fire with the help of carriage barrels is considered.

It was found that the existing set of measures to ensure fire safety in engine rooms of nuclear and thermal power plants has a number of significant shortcomings.

The research and development works aimed at increasing the explosion and fire safety of generators and in general the control rooms of power plants are considered.

Key words: engine rooms, fire hazard, hydrogen, nuclear and thermal power plants, oil, turbo generators.

Скиба М.І.

Український державний університет науки та технологій

Коваленко І.Л.

Український державний університет науки та технологій

Скиба Ю.М.

Український державний університет науки та технологій

Куниця Д.В.

Український державний університет науки та технологій

Купрін М.О.

Український державний університет науки та технологій

Воробйова В.І.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПЛАЗМОХІМІЧНО ОДЕРЖАНИХ НАНОЧАСТИНОК ЗОЛОТА ДЛЯ КОЛОРИМЕТРИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ВИБУХОВИХ НІТРОАРОМАТИЧНИХ РЕЧОВИН

У статті здійснено дослідження щодо розробки колориметричного зонду на основі функціоналізованих плазмохімічно одержаних наночастинок золота (Au НЧ) для визначення вибухових нітроароматичних речовин. Наночастинки золота були синтезовані плазмохімічним способом з водного розчину прекурсорів із використанням традиційного стабілізатора наночастинок (цитрату натрію) з послідовною модифікацією їх поверхні – амінотеолом (тетраметилтіурам дисульфідом). Досліджено та визначено технологічно доцільні умови модифікації поверхні НЧ амінотеолом – тетраметилтіурам дисульфідом, а саме: значення рН середовища, тривалість модифікації НЧ, концентрація тетраметилтіурам дисульфиду тощо). Визначено спектральні характеристики поглинання в УФ-видимому діапазоні, розподілення за розміром та значення дзета потенціалу функціоналізованих наночастинок золота. Встановлено, що після модифікації НЧ золота є стабільними дисперсіями із значенням дзета-потенціалу $-25 \div -30$ мВ, розміром 28–35 нм. Досліджено сенсорні властивості функціоналізованих дисперсій для кількісного колориметричного визначення нітроароматичних речовин (2,4,6-тринітротолуол (тротил)) в водних середовищах. За визначених оптимальних модельних умов поглинання УФ-видимого випромінювання розчину функціоналізованих НЧ з аналітом при $\lambda = 520/610$ нм показало лінійну залежність від концентрації тринітротолуолу в діапазоні концентрації 0,02–0,1 мг/л ($R^2 = 0,98$). Продемонстровано, що метод колориметричного визначення із використанням функціоналізованих наночастинок базується на їх агрегації внаслідок донорно-акцепторної взаємодії між аміногрупами тіраму та нітрогрупами тротилу з характерним зсувом поверхневого плазмонного резонансу наночастинок золота в довгохвильову зону. Встановлено основні валідаційні характеристики кількісного визначення тринітротолуолу із використанням наночастинок: межа виявлення ($LOD = 5$ мкг/л).

Ключові слова: нанозолото, модифікація, тетраметилтіурам дисульфід, сенсор, 2,4,6-тринітротолуол, колориметрія, агрегація.

Постановка проблеми. Представником групи нітроароматичних вибухових речовин, що широко використовується в промисловості та гірничодобувній промисловості [1], і особливо у військовій сфері є 2,4,6-тринітротолуол (тротил) [2]. Тро-

тил є токсичною речовиною і може викликати подразнення при контакті зі шкірою [3]. У людей, які протягом тривалого часу піддавалися впливу тротилу, спостерігалися анемія та порушення функції печінки [4]. Проте післявибухові залишки

в місцях бойових дій забруднюють ґрунт, живі істоти, які харчуються ґрунтом, і підземні води [5]. Агентство з охорони навколишнього середовища США класифікувало тротил як небезпечні відходи, оскільки він є потенційно канцерогенним і мутагенним [6]. Через сильну вибухову властивість тротилу та шкоду, яку він завдає навколишньому середовищу та людям, його виявлення привернуло великий інтерес в останні роки, і були розроблені нові методи підвищення чутливості та вибірковості [7].

На сьогоднішній день для виявлення тротилу відомо значну кількість підходів, серед яких основними є рідинна хромато-мас-спектрометрія [2], газова хромато-мас-спектрометрія [3], високоефективна рідинна хроматографія [5-7] реакційно-мас-спектрометрія з переносом протонів, поверхнево-посилене комбінаційне розсіяння [5, 7] та електрохімічні методи [8]. Засоби визначення нітроароматичних вибухових речовин, а саме інструментальні методи мають недоліки, основними серед яких є те, що вони потребують спеціальної підготовки проб, займають багато часу, потребують добре навченого персоналу, складного та дорогого обладнання.

Тому наразі, для потреби виявлення та контролю за полютантами даної категорії, що утворюються в результаті вибуху та продуктів їх перетворення в навколишньому середовищі, актуальним питанням є розробка високочутливих складових аналітичних тест-систем та сенсорів (аналізаторів) різного спрямування та методик саме оперативного, селективного та чутливого їх визначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові роботи закордонних [1-4] та вітчизняних [5-7] фахівців щодо розробки матеріалів та методів оперативного визначення свідчать, що особливо перспективними є скринінгові системи різного складу із застосуванням наноматеріалів. В роботах закордонних авторів [8, 9] зазначається, про виключну ефективність застосування колориметричних зондів із застосуванням металічних наночастинок Ag, Au конфігурацій (моночастинки та ядро/оболонка, сплав) [10, 11] з різними типами стабілізаторів, тест-систем [12] на основі наноматеріалів завдяки перевагам простоти синтезу, біосумісності, розширеної поверхневої функціоналізації та регульованих фізико-хімічних властивостей, на додаток до локалізованого поверхневого плазмового резонансу. У більшості даних наявних в літературі [5-12], при колориметричному виявленні аналізів, зокрема (нітроароматичних вибухових речовин) наночастинок, зокрема наночастинок золота, змі-

нюють свій колір залежно від їхнього агрегатного стану та взаємодії з аналітом. У всіх публікаціях, одним із найважливіших складових розробки сенсора та дослідження його властивостей є кон'югація наночастинок із аналітом. Це процес, під час якого наночастинки функціоналізуються (модифікуються) специфічними молекулами або лігандами, які можуть вибірково зв'язуватися з цільовим аналітом. Тобто основними складовими процесу є по-перше, функціоналізація наночастинок (наночастинки покривають молекулами, які мають хімічні групи, здатні специфічно зв'язуватися з аналітом; друге – взаємодія з аналітом; третє – зміна оптичних властивостей (зв'язування аналіту змінює оптичні властивості наночастинок, такі як поверхневий плазмонний резонанс, що, у випадку колориметричного виявлення, призводить до видимої зміни кольору).

Тому, саме підбір сполуки-функціоналізатора та дослідження його ефективності, на ряду з визначенням впливу параметрів функціоналізатора (концентрація, об'єм тощо) і наночастинок (розмір, дисперсність тощо), є ключовими факторами при розробці сенсорних системах, зокрема у колориметричному виявленні.

Для визначення тротилу в літературних джерелах описані ефективні колориметричні датчики, у яких AuНЧ були модифіковані цистеїном [10-12] або цистеаміном. Ці модифікатори містять тіолові (-SH) та амініні (-NH₂) групи. Використовуючи датчик AuНЧ, з цистеїном (Au/Цистеамін), було отримано лінійну калібрувальну криву в концентраційному діапазоні $4 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-10}$ М тротилу, яка логарифмічно корелювала з концентрацією аналіту. Однак записані спектри поглинання в цьому концентраційному діапазоні демонстрували залежність від концентрації.

Тетраметилтіурам дисульфід (тірам) як модифікатор AuНЧ потенційно є дешевшим за інші амінотіоли для виготовлення зондів, але може конкурувати з ними щодо селективності та чутливості аналізу нітровибухових речовин. Тетраметилтіурам дисульфід, більш відомий як тірам, є окисленою формою диметилдитіокарбамату. Він використовується як сільськогосподарський фунгіцид для захисту врожаю від хвороб та псування під час зберігання або транспортування. Тірам широко застосовується на фруктових, овочевих, декоративних рослинах, а також трав'янистих культурах, забезпечуючи захист насіння.

Постановка завдання. Тому метою роботи було здійснити дослідження щодо функціоналізації плазмохімічно одержаних наночастинок

золота та їх використання для колориметричного визначення вибухових нітроароматичних речовин (тротилу).

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. Одержання стабілізованих колоїдних розчинів наночастинок золота НЧ здійснювали шляхом обробки суміші попередньо одержаних водних розчинів прекурсорів $[Au^{3+}]$ ($0,1$ ммоль/л) із солі тетрахлоораурату водню $HAuCl_4$ та реагенту-стабілізатору [СТАБ] = цитрату натрію при мольному співвідношенні $[Me]:[СТАБ] = 1$ розрядом плазми, що формується в реакторі. Параметри формування плазмового розряду: сила струму $I = 120$ мА і $P = 0,8$ МПа. Концентрація Au^{3+} . Загальний об'єм розчину $V = 40$ мл.

До розчину наночастинок золота (Au НЧ) додавали модифікуючий агент тетраметилтіурамдисульфід (тірам, $2,0$ мл, $1,0 \times 10^{-5}$ М) (Au-наночастинок агрегують при всіх концентраціях тіраму вище $1,0 \times 10^{-5}$ М), після чого суміш перемішували при кімнатній температурі протягом 15 годин. Після закінчення цього часу розчин модифікованих наночастинок золота розподіляли в центрифужні пробірки по $5,0$ мл кожна і центрифугували при $10\ 000$ об/хв протягом 30 хвилин. Супернатант видаляли, а осад промивали водою ($200,0$ мкл) і збирали в одну колбу об'ємом $10,0$ мл, після чого розбавляли до $10,0$ мл водою. Отриманий розчин наночастинок золота, модифікованих тірамом (Au НЧ/Тірам), використовували для визначення тротилу. Поглинання одержаних дисперсій залежно від умов синтезу реєстрували за допомогою спектрофотометра UV-Vis UV-5800PC з використанням кварцових кювет.

Дослідження колориметричної активності одержаних нанодисперсій здійснювали відповідно до наступної методики. Змішували $0,2$ мл дисперзованого розчину AuНЧ/Тірам та $0,01$ мл ацетатний буфер амонію (рН $7,0$ ($1,0 \times 10^{-1}$ М)). До отриманої суміші додавали різні концентрації розчину тринітротолуол в ацетонітрилі ($0,02$ – $0,12$ мг/л). Після цього суміш розбавляли ацетонітрилом до об'єму $1,0$ мл. УФ-спектри поглинання реєстрували в діапазоні 400 – 800 нм.

Для здійснення кількісної оцінки було визначено скореговане значення поглинання (A'), за рівнянням рівнянні (1):

$$A' = (A_{610}/A_{520})_s - (A_{610}/A_{520})_k \quad (1)$$

При наведеному вище методі розрахунку значення абсорбції зразок не залежав від кількості наночастинок, а калібрувальне рівняння було отримано з корегованим значенням поглинання

($A'_{610/520}$). Значення межі виявлення (LOD) розраховували на основі параметрів градууювальної прямої (S_a – стандартне відхилення вільного члена та b – тангенса нахилу) відповідно до рівнянь (2):

$$LOD = 3,3 S_a/b; \quad (2)$$

Отримані експериментальні результати.

У молекулі тіраму (тетраметилтіурамдисульфід) присутні два зв'язки: дисульфідний зв'язок (S–S) з'єднує дві молекули тіокарбаматної групи, а моносульфідний зв'язок (C=S) є частиною цих груп. Тому слід було очікувати, що при функціоналізації наночастинок золота тірамом його сірчані групи можуть ковалентно зв'язуватися з поверхнею золота, утворюючи стабілізаційне покриття. В результаті такої функціоналізації, у модифікованих тірамом НЧ третинні аміногрупи тіраму залишаються вільними на поверхні НЧ і доступними для подальшої взаємодії з аналітами.


Відомо, що модифікатор, який використовується у високій концентрації або у великих об'ємах при тій самій концентрації, може безпосередньо агрегувати дисперсії Au НЧ без додавання аналіту. Тому першочергово було досліджено доцільні параметри функціоналізації дисперсій НЧ тірамом: концентрація, об'єм тіраму та тривалість модифікування. Результати наведено в табл. 1.

Для оптимізації концентрації та об'єму модифікатора тіраму було досліджено модифікування протягом 15 годин, використовуючи різні концентрації тіраму (від $1,0 \times 10^{-6}$ до $1,0 \times 10^{-3}$ М). Виявлено, що при концентраціях тіраму вище $1,0 \times 10^{-5}$ М наночастинок золота агрегують (табл. 1). Також наночастинок модифікували, додаючи різні об'єми тіраму (від $1,0$ до $4,0$ мл) при концентрації $1,0 \times 10^{-5}$ М. Було визначено, що оптимальний об'єм модифікатора становить $2,0$ мл (табл. 1).

На рис. 1 наведено спектри, СЕМ-зображення та розподілення за розміром плазмохімічно одержаних та функціоналізованих за оптимальних умов тірамом плазмохімічно одержаних колоїдних розчинів НЧ Au. Видно, що функціоналізовані за оптимальних умов тірамом наночастинок характеризуються однаковим плазмонним резонансом НЧ Au в УФ-частині видимого спектру (близько $\lambda = 520$ – 530 нм), що характерний НЧ з розміром 20 – 30 нм.

Для досягнення оптимального аналітичного сигналу від взаємодії AuНЧ/Тірам з аналізом-тротилом було вивчено вплив рН середовища на колориметричне виявлення. Використовувався трис-НСІ буфер у різних рН-діапазонах (від $6,0$ до $8,0$). Дослідження показало, що найкращий сигнал при взаємодії тротилу з AuНЧ/Тірам фор-

Таблиця 1
Оптимізація функціоналізації плазмохімічно одержаних наночастинок золота тірамом

Концентрація тіраму, М	Виявлення агрегації наночастинок УФ-спектри	
$1,0 \times 10^{-6}$ М	–	
$1,0 \times 10^{-5}$ М	–	
$1,0 \times 10^{-4}$ М	+	
$1,0 \times 10^{-3}$ М	+	
Об'єм тіраму (при $1,0 \times 10^{-5}$ М)	Виявлення агрегації наночастинок	
1,0 мл	–	
2,0 мл	–	
3,0 мл	+	
4,0 мл	+	

мується при рН 7. На графіку представлено відношення поглинання (A_{610}/A_{520}) розчинів AuНЧ/Тірам у присутності тротилу залежності від рН середовища. Найвищі показники відношення поглинання досягнуті при рН 7, що вказує на оптимальні умови для взаємодії між AuНЧ/Тірам та аналітами (тротилом).

Було досліджено колориметричні характеристики функціоналізованих дисперсій AuНЧ/Тірам. УФ-видові спектри зонда були зафіксовані в присутності різних концентрацій тротилу за оптимальних умов. УФ-спектри поглинання розчинів зонда AuНЧ/Тірам у присутності тротилу показали появу нової смуги в діапазоні 600–800 нм, яка виникає внаслідок агрегації наночастинок, поряд з характерною смугою ППР для наночастинок золота, що спостерігався при $\lambda=520$ нм. Проте в новій смузі, сформованій внаслідок агрегації, не спостерігається чіткий пік. Замість цього відзначається плавне збільшення довжини хвилі (610 нм для тротилу та 650 нм для тетриллу).

Як показано на рис. 3, поглинання розчину AuНЧ/Тірам при 610 нм у присутності амоній-ацетатного буфера (рН 7,0) поступово зростало зі збільшенням концентрації тротилу в діапазоні від 0,0 до 0,15 мг/л. Для отримання надійного лінійного співвідношення в концентраційному діапазоні від 0,02 до 0,10 мг/л було побудовано графік скоригованої абсорбції ($A'_{610/520}$) в залежності

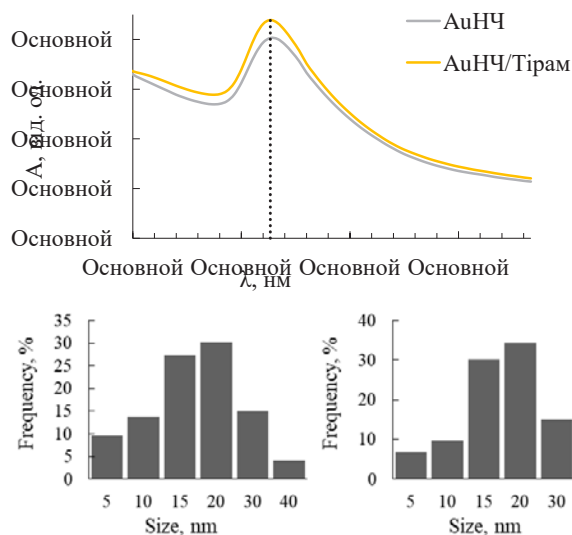


Рис. 1. Спектри, СЕМ-зображення та розподілення за розміром плазмохімічно одержаних Au та функціоналізованих тірамом за оптимальних умов

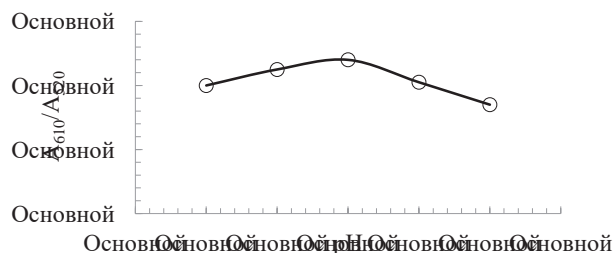


Рис. 2. Вплив рН середовища при колориметричному визначенні тринітротолуолу

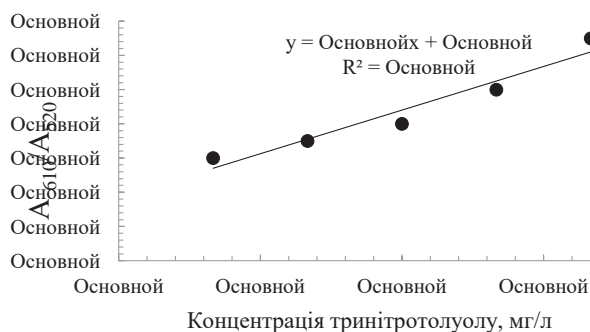


Рис. 3. Колориметричне визначення тротилу із використанням наночастинок золота – лінійна калібрувальна крива коефіцієнта поглинання AuНЧ/Тірам зі збільшенням концентрації тринітротолуолу

від концентрації тротилу, який показав високий коефіцієнт кореляції, рівний 0,9968.

В табл. 2 наведені основні валідаційні характеристики кількісного визначення тротилу: інтервал лінійності градуовального графіку у діапазоні концентрацій; коефіцієнти регресії рівняння градуовального графіку, які розраховані методом

найменших квадратів, межа виявлення аналіту, межа кількісного визначення.

Таблиця 1
Аналітичні характеристики Au НЧ
як сенсора для тринітротолуолу

Зразок НЧ золота	Аналіт	Лінійний діапазон, мг/л	Значення межі виявлення LOD, мкмоль/л	Коефіцієнт варіації, у відсотках (N = 5)
Au/Тірам	Тротил	5,0–25,0	5,81	0,98

Висновки. У цій статті досліджено розробку колориметричного зонда на основі плазмохімічно синтезованих наночастинок золота (Au НЧ) для виявлення вибухових нітроароматичних сполук. Наночастинок золота синтезували за допомогою плазмохімічної методики з використанням традиційного стабілізатора – цитрату натрію. Далі

поверхня наночастинок була функціоналізована тетраметилтіурам дисульфідом (амінотеолом). Було досліджено умови модифікації поверхні, такі як рН, тривалість процесу та концентрація тетраметилтіурам дисульфиду, щоб визначити оптимальні параметри для стабільності дисперсій. Визначено спектральні характеристики в УФ-видимому діапазоні, розмір частинок та дзета-потенціал. Функціоналізовані наночастинок показали стабільність із дзета-потенціалом в межах від -25 до -30 мВ і розмірами частинок $28-35$ нм. Було також досліджено чутливість зонда до виявлення нітроароматичних сполук у воді. За оптимальних умов, УФ-видимі спектри при $\lambda=520/610$ нм демонстрували лінійну залежність поглинання від концентрації тринітротолуолу (ТНТ) у діапазоні $0,02-0,1$ мг/л ($R^2 = 0,98$). Встановлено, що межа виявлення тринітротолуолу складає 5 мкг/л.

Список літератури:

- Zhao X., Yinon J., Fanning K. Characterization and origin identification of 2,4,6-trinitrotoluene through its by-product isomers by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*. 2002. 975. P. 197–205. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)01145-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)01145-8)
- Bai X., Zhang, W. Zhang, L., Zhang X. Surface plasmon resonance-enhanced photothermal nanosensor for sensitive and selective visual detection of 2,4,6-trinitrotoluene. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. 228. P. 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.01.074>.
- Eisner L., Wilhelm I., Flachenecker G., Hürttlen J., Schade W. Molecularly imprinted sol-gel for TNT detection with optical micro-ring resonator sensor chips. *Sensors*. 2019. 19 (19). P. 3909. <https://doi.org/10.3390/s19183909>
- Erçağ E., Üzer A., Apak R. Selective spectrophotometric determination of TNT using a dicyclohexylamine-based colorimetric sensor. *Talanta*. 2009. 78(3). P. 772–780. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.12.042>
- Dasary S. S. R., Singh A. K., Senapati D., Yu H., Ray P. C. Gold nanoparticle based label-free SERS probe for ultrasensitive and selective detection of trinitrotoluene. *Journal of the American Chemical Society*. 2009. Vol. 131. P. 13806–13812. <https://doi.org/10.1021/ja906086c>
- Ilyas Q., Waseem M. T., Junaid H. M., Khan Z. A., Munir F., Jabbar Shaikh A., Shahzad S. A. Fluorescein based fluorescent and colorimetric sensors for sensitive detection of TNP explosive in aqueous medium: Application of logic gate. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2022. 272. 120994. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.120994>.
- Oskoei Y. M., Fattahi H., Hassanzadeh J., Azar A. M. Selective determination of trinitrotoluene based on energy transfer between carbon dots and gold nanoparticles. *Analytical Sciences*. 2016. 32(2). P. 193–199. <https://doi.org/10.2116/analsci.32.193>
- Trofimov V. A., Varentsova, S. A. A possible way for the detection and identification of dangerous substances in ternary mixtures using THz pulsed spectroscopy. *Sensors*. 2019. 19 (10). P. 2365. <https://doi.org/10.3390/s19102365>
- Üzer A., Erçağ E., Apak R. (2004). Selective spectrophotometric determination of trinitrotoluene, trinitrophenol, dinitrophenol and mononitrophenol. *Analytica Chimica Acta*, 505 (1). P. 83–93. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(03\)00674-3](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(03)00674-3)
- Rujiralai, T., Leelaharat, N., & Cheewasedtham, W. (2024). Highly specific colorimetric detection based on aggregation of L-cysteine functionalized gold nanoparticles for cypermethrin in water samples. *RSC Advances*. 13. P. 9175–9183. <https://doi.org/10.1039/d3ra07626a>
- Devi S., Singh B., Paul A. K., Tyagi S. Highly sensitive and selective detection of trinitrotoluene using cysteine-capped gold nanoparticles. *Analytical Methods*. 2016. 8 (22). P. 4398–4405. <https://doi.org/10.1039/C6AY01036A>
- Saglam S., Üzer A., Erçağ E., Apak R. Electrochemical determination of TNT, DNT, RDX, and HMX with gold nanoparticles/poly(carbazole-aniline) film-modified glassy carbon sensor electrodes imprinted for molecular recognition of nitroaromatics and nitramines. *Analytical Chemistry*. 90 (12). 2018. P. 7364–7370. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b00715>

13. Idros N., Ho M.Y., Pivnenko M., Qasim M.M., Xu, H., Gu Z., Chu D. Colorimetric-Based Detection of TNT Explosives Using Functionalized Silica Nanoparticles. *Sensors*. 2015. 15. P. 12891–12905. <https://doi.org/10.3390/s150612891>

Skyba M.I., Kovalenko I.L., Skyba Yu.M., Kuntz D.V., Kuprin M.O., Vorobiova V.I.
FUNCTIONALIZATION OF PLASMACHEMICALLY OBTAINED GOLD NANOPARTICLES FOR THE COLORIMETRIC DETERMINATION OF EXPLOSIVE NITRO-AROMATIC SUBSTANCES

The article deals with the development of a colorimetric probe based on functionalized plasma-chemically obtained gold nanoparticles (Au NPs) for the determination of explosive nitroaromatic substances. Gold nanoparticles were synthesized by a plasma-chemical method from an aqueous precursor solution using a traditional nanoparticle stabilizer (sodium citrate) with subsequent modification of their surface – aminothiols (tetramethylthiuram disulfide). The technologically appropriate conditions for modifying the surface of NPs with aminothiols-tetramethylthiuram disulfide were investigated and determined, and the following: the pH value of the medium, the duration of modification of NPs, the concentration of tetramethylthiuram disulfide, etc.). Spectral characteristics of absorption in the UV-visible range, size distribution and zeta potential value of functionalized gold nanoparticles were determined. It was found that after modification, gold NPs are stable dispersions with a zeta potential value of $-25 \div -30$ mV and a size of 28–35 nm. Sensory properties of functionalized dispersions for quantitative colorimetric determination of nitroaromatic substances (2,4,6-trinitrotoluene (TNT)) in aqueous media were investigated. Under the determined optimal model conditions, the absorption of UV-visible radiation of a solution of functionalized NPs with an analyte at $\lambda = 520/610$ nm showed a linear dependence on trinitrotoluene concentrations in the concentration range of 0.02–0.1 mg/l ($R^2 = 0.98$). It has been demonstrated that the method of colorimetric determination using functionalized nanoparticles is based on their aggregation as a result of the donor-acceptor interaction between thiram amino groups and nitro groups of TNT with a characteristic shift of the surface plasmon resonance of gold nanoparticles to the long-wavelength zone. The main validation characteristics of the quantitative determination of trinitrotoluene using nanoparticles were established: the limit of detection (LOD = 5 μ g/l).

Key words: nanogold, modification, tetramethylthiuram disulfide, sensor, 2,4,6-trinitrotoluene, colorimetry, aggregation.

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.8.047

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/37>

Дмитренко Н.В.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Гусарова О.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

ВПЛИВ НВЧ-ОБРОБКИ НА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАРЕНХІМНИХ ТКАНИН ЯБЛУК, КОНВЕКТИВНЕ СУШІННЯ ТА ОРГАНОЛЕПТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЧИПСІВ

У статті розглянуто вплив технічних параметрів НВЧ-обробки на приведену питому теплоту випаровування води з тканин яблука, конвективне сушіння, коефіцієнт набухання, відновлюваність та органолептичні показники чипсів. За останні роки стали популярними дослідження присвячені використанню НВЧ-хвиль в технологіях сушіння рослин, зокрема яблук. Нові способи обробки викликають значний інтерес, а використання в технологіях сушіння електромагнітних хвиль високої (ВЧ) і надвисокої частоти (НВЧ) вважається перспективним.

Метою статті є визначення впливу попередньої НВЧ-обробки на теплоту випаровування вологи з паренхімних тканин яблук, технологічні параметри процесу конвективного сушіння та якість одержаних чипсів.

Як об'єкт досліджень було використано яблука сорту «Ренет Симиренко». Потужність впливу НВЧ-хвиль варіювали в діапазоні від 400 до 800 Вт, а час – в діапазоні 15...30 с. Процес сушіння яблук досліджували на експериментальному конвективному сушильному стенді при швидкості сушильного агента 1,5 м/с, вологовмісті 7 г/кг сухого повітря, при ступеневому режимі зневоднення 80...60 °С.

Після НВЧ-обробки спостерігається суттєве підвищення витрат теплоти на випаровування (на 8...16% по відношенню до теплоти випаровування чистої води), що свідчить як про зміну водоутримуючої здатності рослинної тканини, так і про видалення всієї вільної води з сировини ще на стадії НВЧ-обробки через різке послаблення гідратних зв'язків. Поєднання попередньої НВЧ-обробки нарізаних скибок яблук з подальшим двохстадійним конвективним сушінням зменшило загальну тривалість процесу на 14%, що тотожне зменшенню енергетичних витрат на процес. Короткочасна НВЧ-обробка вирівняла та стабілізувала колір паренхімних тканин яблук: підготовлені до сушіння скибки та готові чипси не окислювались протягом значного часу. Відбулося суттєве підвищення відновлюваності яблучних чипсів (до 96,7% проти 64,7% для необроблених). Одержані чипси набули вираженого смаку, легкої ламкості та ніжного хрускоту.

Ключові слова: НВЧ-обробка, теплофізичні властивості, конвективне сушіння, відновлюваність, чипси з яблук, енергоефективність.

Постановка проблеми. В останні роки в харчовій промисловості та ресторанному господарстві набули широкого використання фруктові чипси, як самостійний продукт і для приготування різноманітних страв. Основним завданням їх одержання стало створення теплотехнологій, які б дозволяли отримати продукт з низькою залишковою вологістю (6...8%) при мінімальних витратах енергії та часу. Для підвищення ефективності процесу сушіння та якості продукту

використовують різні способи, зокрема попередню обробку сировини перед сушінням, бо певні фактори впливу здатні викликати зміни у складі та внутрішній морфологічній структурі рослинних тканин. Це відбивається на стані води в тканинах, кінетиці сушіння та змінах у витратах енергії на їх зневоднення.

Перед сушінням більшість рослинної сировини попередньо механічно обробляють: миють, чистять, подрібнюють. Вже при цьому відбува-

ються складні фізичні, фізико-хімічні, структурні та біохімічні процеси, які змінюють природні та технологічні властивості продуктів.

Наприклад, при очищенні та подрібненні картоплі, деяких овочів і фруктів спостерігається їхнє потемніння на повітрі, викликане окисненням тиразину. Тому, використовують їх додаткову попередню обробку парою, гарячим повітрям, гарячою або киплячою водою, водними розчинами органічних кислот, лугів, харчових речовин (розсоли, сиропи) [1, 2].

Останнім часом використовують також обробку інфрачервоним промінням (ІЧ), струмами високої (ВЧ) та надвисокої частоти (НВЧ) [1-3].

За останні роки відбулось значне за об'ємом патентування та публікування статей присвячених використанню НВЧ-хвиль в технологіях сушіння рослин, зокрема яблук [3-7]. Проте, публікацій присвячених дослідженню впливу НВЧ випромінювання на теплофізичні властивості рослинних тканин та технологічні параметри їх сушіння досить мало.

Нові способи обробки викликають значний інтерес, а використання в технологіях сушіння електромагнітних хвиль високої (ВЧ) і надвисокої частоти (НВЧ) вважається перспективним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Особливості впливу мікрохвиль на рослинні матеріали. Попередня обробка є необхідною умовою руйнування окислювальних ферментів з метою запобігання псування продукту в процесі зневоднення та зберігання, збереження його кольору, смаку, запаху, вітамінної активності. Часто вона сприяє більш швидкій міграції води всередину рослинної тканини і пришвидшенню процесу сушіння [1, 2].

Вид та технологічні параметри операцій додаткового впливу на сировину визначаються поставленою практичною задачею. Неякісно проведені технологічні операції можуть призвести до одержання продукту, що різко відрізняється від вихідного матеріалу за смаковими якостями та біологічною цінністю.

Можливість застосування електромагнітного опромінення при сушінні вологої сировини обумовлена електромагнітною природою будь-якої речовини та пов'язана з впливом електромагнітних хвиль на її фізичні характеристики: теплоємність, теплопровідність, електропровідність, діелектричну, магнітну та оптичну проникність. У речовині відбуваються зміни в стані електричних зарядів, які призводять до зміни фізичних і хімічних характеристик матеріалу. Довжина

електромагнітних хвиль обумовлює характер перетворень, а їх квантова енергія – можливість перетворень. Взаємозв'язок довжини електромагнітних хвиль та енергії квантів встановлює рівняння Планка.

Найбільш простий та старий метод впливу на рослинну сировину електромагнітним опроміненням – використання енергії сонячних променів. Зокрема для сушіння трави на сіно. Але цей метод залежить від погодних умов та пов'язаний з великими втратами поживних речовин рослин через ферментативні процеси.

Основою класифікації сучасних електрофізичних методів впливу на рослинну сировину є частота коливань застосованих електромагнітних хвиль: інфрачервоні, високі та надвисокі. Сировина, піддана опроміненню електромагнітними хвилями високих (ВЧ) та надвисоких (НВЧ) частотних діапазонів, завдяки глибокому проникненню таких променів в матеріал, нагрівається зсередини: в ній зростає інтенсивність теплового руху атомів і молекул. При цьому, важливою характеристикою матеріалу є його здатність до поглинання випромінювання.

Здатність хімічно різних матеріалів до поглинання електромагнітних хвиль різна, бо різні сполуки мають максимуми поглинання в різних частотних діапазонах. Наявність таких максимумів дозволяє так підбирати довжину хвиль електромагнітного опромінення, щоб забезпечити необхідний прогрів матеріалу та розкладання саме тих сполук, що треба. Наявність резонансного впливу електромагнітних хвиль на міжмолекулярні зв'язки, частоти коливань яких співпадають чи є кратними частоті хвиль опромінення, уможливорює ініціацію процесів хімічних перетворень. А застосування електромагнітних хвиль, які краще поглинаються певною сполукою, сприяє кращому її збереженню.

Проведені у 1958 році О. Кришером [8] дослідження коефіцієнтів відбивання R і поглинання A електромагнітного випромінювання вологими рослинами показали, що їх коефіцієнт поглинання має значення $\sim 35\%$ у видимій області спектру, а потім зростає, досягаючи максимального значення при довжині хвиль 3 мкм.

До особливостей НВЧ-впливу на рослинні матеріали, які полегшують їх сушіння, треба віднести: здатність проникати на значну глибину всередину матеріалу, незалежність тривалості нагрівання до необхідної температури від об'єму і форми об'єкта сушіння, відсутність безпосереднього контакту поверхні матеріалу з теплоносієм,

великий ККД перетворення енергії в теплоту всередині об'єкту сушіння [1, 2]. Крім того, відбувається інтенсифікація сушіння, бо всередині виникає спрямований в одному напрямку градієнт тиску вологи та пари, і перенос вологи відбувається зразу у всьому об'ємі тіла. Також, є можливість плавно регулювати температуру матеріалу при сушінні, змінюючи напругу ВЧ та НВЧ полів [3].

Найбільша ефективність застосування впливу ВЧ і НВЧ полів досягається в технологіях передпосівної підготовки насіння зернових, лікарських та овочевих культур [9, 10]. При використанні НВЧ-опромінення відбувається повне знезараження сухофруктів від спор видів *Mucor*, *Penicillium*, *Phomopsis* і загального мікробного забруднення [2].

Використання НВЧ-апаратів скорочує в 3...10 разів тривалість необхідного теплового впливу на сировину. Овочі швидко пом'якшуються, але не встигають відбутися помітні зміни в їх основних речовинах, що визначає належні органолептичні показники кінцевого продукту. При цьому, існує взаємозв'язок між ступенем етерифікації полігалактуронових кислот клітинних стінок рослинних тканин та необхідною тривалістю НВЧ-обробки: чим вищий ступень етерифікації, тим довша повинна бути тривалість впливу [11].

При попередній обробці овочів в НВЧ-апаратах втрати розчинних речовин практично не відбуваються, а збереженість вітаміну С зростає на 20...25% порівняно з обробкою парою, що обумовлено відносно швидким їх прогрівом [12].

Під впливом НВЧ-енергії відбувається максимально повне вивільнення рослинних ефірних олив (до 99,5%) та розчинних солей. Завдяки виникненню всередині тканин надлишкового тиску парів води, вони «виштовхують» ці речовини з клітин на поверхню, що полегшує їх екстрагування [13].

Як видно з літературного огляду, розглянуті способи обробки викликають значний інтерес, набувають широкого використання для різних цілей, зокрема для попередньої обробки фруктів та овочів перед сушінням і дослідження у цьому напрямку необхідно розширювати.

Метою статті є визначення впливу попередньої НВЧ-обробки на теплоту випаровування вологи з паренхімних тканин яблук, технологічні параметри процесу конвективного сушіння та якість одержаних чипсів.

Матеріали та методи. Для проведення досліджень було вибрано яблука сорту «Ренет Сими-

ренко». Яблука попередньо мили і нарізали тонкими (~4 мм) скибками, видаляючи насінневу камеру. Підготовлені зразки піддавали НВЧ-впливу всередині побутової НВЧ-печі Panasonic. Потужність впливу варіювали в діапазоні від 400 до 800 Вт, а час – в діапазоні 15...30 с, щоб підібрати параметрів впливу, які б дозволили інтенсифікувати процес сушіння, але не призводили до зниження смакових якостей та біологічної цінності кінцевого продукту. За допомогою термопар сліdkували, щоб температура зразків під час обробки не перевищувала 60 °С, бо її перевищення призводить до руйнування тканин яблука.

Для визначення впливу НВЧ-обробки на значення питомої теплоти випаровування вологи з паренхімних тканин яблука було застосовано диференціальний мікрокалориметр випаровування ДМКИ-01, розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України [14]. Принцип його дії засновано на синхронному вимірі зміни маси вологого матеріалу та кількості теплоти, що витрачена на його зневоднення під час ізотермічного конвективно-кондуктивного сушіння всередині теплового блоку. Для збору та обробки дослідних даних було використано персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

Для вивчення впливу НВЧ-обробки на тепло-масообмінні процеси при сушінні яблук на чипси було використано конвективний сушильний стенд Інституту [15]. Підготовлені та НВЧ-оброблені скибки яблук розміщували на сітчастий піддон розміром 100×50×4 мм, який закріплювали на штанзі терезів всередині сушильної камери. Для заміру зміни температури матеріалу під час сушіння всередину зразків поміщали термопару. Для збору дослідних даних було використано персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

Одним із критеріїв оцінки якості сушених продуктів є їх властивість до набухання та відновлювання. Для дослідження якості кінцевого продукту визначали коефіцієнт набухання та відновлюваність отриманих чипсів по методиці Б. В. Зозулевича.

Виклад основного матеріалу

1. Дослідження впливу технічних параметрів НВЧ-обробки на теплоту випаровування вологи з паренхімних тканин яблука

За дослідними даними, отриманими за допомогою ДМКИ-01, було розраховано зміну питомих витрат теплоти на випаровування під час сушіння необроблених та НВЧ-оброблених зразків паренхімних тканин яблука (рис. 1).

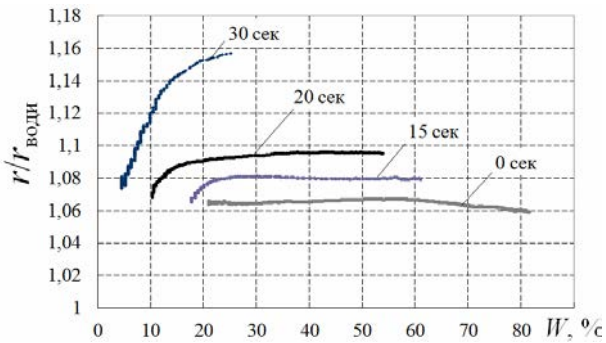


Рис. 1. Зміна приведеної питомої теплоти випаровування води з тканин яблука в залежності від їх відносної вологості під час конвективно-кондуктивного сушіння та часу НВЧ-обробки потужністю 800 Вт ($t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 0,8\text{ м/с}$, $d = 6\text{ г/кг}$ сухого повітря)

Джерело: власні дослідження

Результати досліджень свідчать про суттєвий вплив попередньої НВЧ-обробки на стан тканин яблука. Фізико-хімічні зміни, які відбулися в них, призвели до суттєвого підвищення витрат теплоти на випаровування, причому витрати тим більші, чим довше було опромінювання. Це могло відбутися як через зміну водоутримуючої здатності рослинної тканини, так і через видалення всієї вільної води з сировини ще на стадії процесу попередньої НВЧ-обробки. Суттєве підвищення теплоти випаровування після НВЧ-обробки може ускладнити та сповільнити процес сушіння, але суттєве зменшення початкової вологості тканин (від 82 до 62...25% відн.) повинно зменшити час їх подальшого конвективного сушіння.

Кінцевий результат впливу НВЧ-обробки на тривалість сушіння досить суперечливий, тому було здійснено його перевірку на сушильному експериментальному стенді.

Те, що попередня НВЧ-обробка дала можливість досушити тканини яблука до більш низької кінцевої вологості (17...5% відн. проти 20% для необроблених) при тих же умовах сушіння означає, що рівноважна вологість знизилась і для інших температур. Це свідчить про позитивний вплив НВЧ-обробки на пом'якшення умов подальшого зберігання готових чипсів.

Різка зниження теплоти випаровування наприкінці процесу сушіння НВЧ-оброблених тканин яблука (тим більше, чим триваліша обробка) відбулося через накладання на ендотермічний процес випаровування певного екзотермічного процесу, найвірогідніше – процесу кристалізації цукрів при значному зневодненні тканин. Це припущення підтверджує появу легкої ламкості та ніжного хрускоту у виготовлених за такою технологією чипсах. Такого явища ніколи раніше

в дослідженнях теплоти випаровування води з необроблених яблук не спостерігалось [16, 17].

На підґрунті аналізу цих досліджень, потужність НВЧ-опромінювання зразків у 800 Вт та тривалість у ~20...25 с були визнані найбільш адекватними для попередньої НВЧ-обробки паренхімних тканин яблука. При таких параметрах НВЧ-опромінення тканини вже встигають трохи підсушитися, але ще не відбувається значного підвищення питомої теплоти випаровування води з них [18, 19].

2. Дослідження впливу попередньої НВЧ-обробки на інтенсифікацію процесу конвективного сушіння паренхімних тканин яблука

Порівняння витрат часу на конвективне сушіння паренхімних тканин яблук без обробки та попередньо НВЧ-оброблених проводили при швидкості сушильного агента (повітря) $v = 1,5\text{ м/с}$ та його вологості $d = 7\text{ г/кг}$ с.п. при ступеневому режимі зміни температури сушіння з $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ на початковому етапі до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, коли температура зразка всередині наближувалась до критичної позначки у $55...58\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2).

Оскільки після попередньої НВЧ-обробки знизилась початкова вологість тканин яблука і збільшилась питома теплота випаровування з них води (рис. 1), швидкість їх прогрівання під час конвективного сушіння теж знизилась (рис. 2). Це призвело до позитивного ефекту полегшення контролю процесу прогрівання матеріалу та дозволило виключити випадкове перегрівання продукту і погіршення його якості через підгрівання при температурі $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

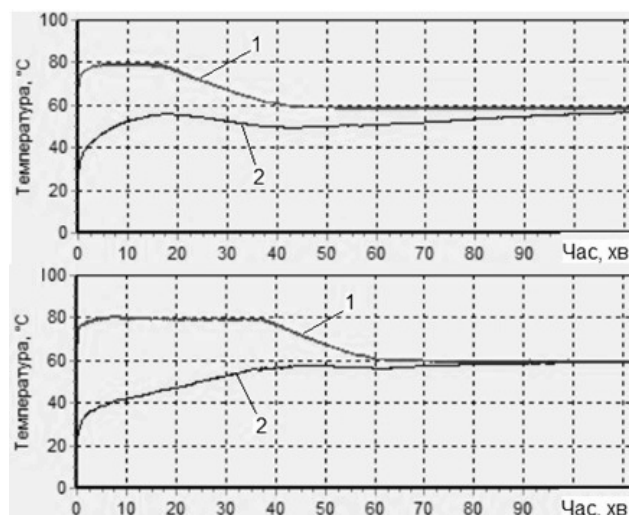


Рис. 2. Зміна температури сушильного агента (1) та температури всередині зразків (2) для необроблених (а) та НВЧ-оброблених (б) паренхімних тканин яблука під час сушіння на конвективному сушильному стенді

Джерело: власні дослідження

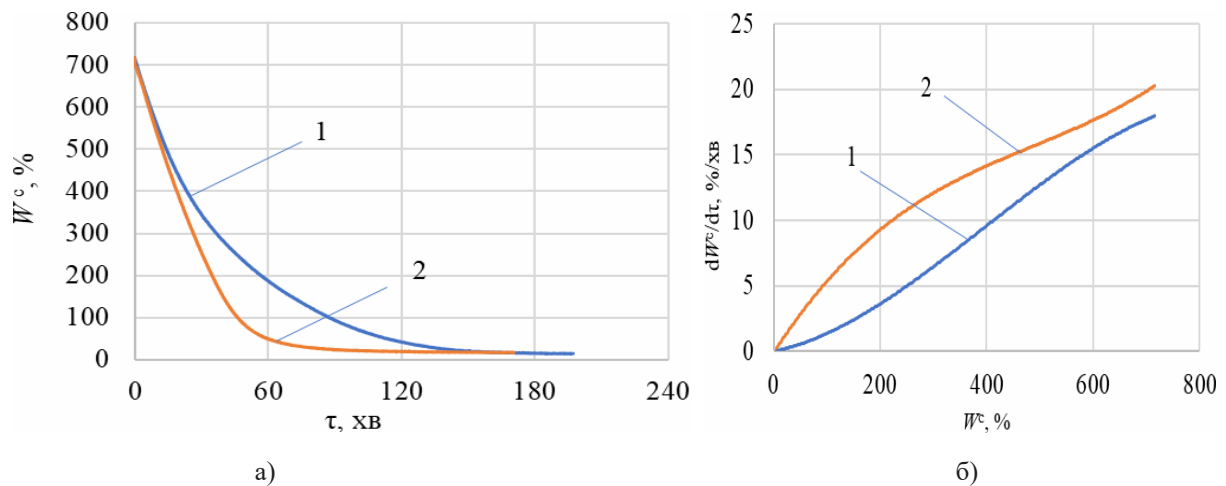


Рис. 3. Кінетика (а) та швидкість (б) сушіння паренхімних тканин яблук свіжих (1) та попередньо НВЧ-оброблених протягом 25 с при 800 Вт (2)

Джерело: власні дослідження

Аналіз процесу теплового зневоднення паренхімних тканин яблук здійснювали на підставі побудованих за даними експерименту кривих кінетики та швидкості сушіння (рис. 3).

Аналіз кривих сушіння (рис. 3, а) свідчить про суттєвий вплив попередньої НВЧ-обробки на стан паренхімних тканин яблука. По-перше, після попереднього опромінювання паренхімних тканин яблук їх вдалося висушити до кінцевої вологості нижчої, ніж у необроблених (6 та 8% абс. відповідно). По-друге, витрати часу на сушіння до рівноважної з тепловим агентом вологості скоротилися з 215 хв (свіжі яблука) до 193 хв (НВЧ-оброблені яблука), за тих же умов сушіння. Оскільки попереднє НВЧ-опромінення зразків зайняло лише 25 с, загальні витрати часу, необхідного на увесь процес виготовлення яблучних чипсів також скоротилися на 23 хв, якщо зневоднювати НВЧ-оброблені яблука до рівноважної з тепловим агентом вологості або на 53 хв, якщо сушити їх до вологості 8%, цілком достатньої для гарного збереження герметично упакованих яблучних чипсів протягом часу, необхідного для доставки їх кінцевому користувачу [18, 19].

3. Дослідження впливу технічних параметрів НВЧ-обробки на якісні характеристики паренхімних тканин яблук

Результати експериментів свідчать про суттєвий вплив попередньої НВЧ-обробки на якісні характеристики паренхімних тканин яблука. Перш за все, короткочасна мікрохвильова обробка вирівняла та стабілізувала колір паренхімних тканин: підготовлені до сушіння зразки яблука та готові чипси не окислювались протягом тривалого часу (табл. 1).

Одним із критеріїв оцінки якості сушених продуктів є їх властивість до набухання та відновлювання.

Коефіцієнт набухання (K_n) показує відносне збільшення маси продукту після набухання та визначає здатність до відновлювання початкових властивостей матеріалу при зневодненні. Відновлюваність матеріалу (B) є більш показовою величиною і безпосередньо показує наскільки вологість відновленого матеріалу наближається до вихідної або наскільки загальна маса матеріалу після набухання наближається до вихідної маси, яка приймається за 100%. Чим більше значення відновлюваності, тим якісніший одержаний сушений продукт [20].

Результати дослідження коефіцієнту набухання та відновлюваності отриманих чипсів наведено в табл. 2 [19].

Як бачимо, у порівнянні з необробленими зразками, спостерігається суттєве підвищення відновлюваності отриманих чипсів: від 64,7% для необроблених яблук до 81,5...96,7% для попередньо НВЧ-оброблених. Таке високе значення відновлюваності паренхімних тканин, які було піддано висушуванню після попередньої НВЧ-обробки, свідчить про те, що НВЧ-обробка дозволила уберегти від руйнування під час теплового сушіння тканинні капіляри, по яким всмоктується та утримується вода яблука. Надшвидке випаровування вільної вологи з тканинних капілярів під час надкороткої НВЧ-обробки не дозволило розвинути процесам термічної та зневоднюваної деформації та зруйнувати їх [18, 19].

У підсумку треба відмітити, що одержані після попередньої НВЧ-обробки чипси з яблук за кольором, ароматом і смаком мало відрізнялися

Таблиця 1

Дані досліджень окислення зразків яблучних тканин

Зразки необроблені		Зразки НВЧ-оброблені
		
час спостереження 0 хв	час спостереження 5 хв (зразок потемнів)	час спостереження 5...30 хв
		
Одержані чипси		Одержані чипси

Джерело: власні дослідження

Таблиця 2

Коефіцієнт набухання та відновлюваність чипсів

Попередня обробка	Коефіцієнт набухання, K_n	Відновлюваність, B , %
Без попередньої обробки	3,737	64,737
НВЧ-випромінювання потужністю 400 Вт протягом 40 с	3,544	81,528
НВЧ-випромінювання потужністю 600 Вт протягом 35 с	3,241	89,236
НВЧ-випромінювання потужністю 800 Вт протягом 25 с	3,401	96,664

Джерело: власні дослідження

від вихідної сировини, натомість набули більш яркого аромату, легкої ламкості та ніжного хрускоту через утворення кристаликів цукру всередині. Тоді як чипси, вироблені за традиційними технологіями, часто-густо занадто тверді через розвиток процесу склування цукрів всередині рослинної тканини.

Висновки. Суттєве підвищення витрат теплоти на випаровування після НВЧ-обробки (на 8...16% по відношенню до теплоти випаровування чистої води) свідчить як про зміну водоутримуючої здатності рослинної тканини, так і про видалення всієї вільної води з сировини ще на стадії НВЧ-обробки через різке послаблення гідратних зв'язків.

Поєднання попередньої НВЧ-обробки яблук з двостадійним конвективним сушінням дозволило інтенсифікувати процес та на 14% зменшити загальну тривалість процесу зневоднення чипсів з яблук. Зменшення тривалості сушіння тотожне зменшенню енергетичних витрат на процес.

Короткочасна НВЧ-обробка вирівняла та стабілізувала колір паренхімних тканин яблук: підготовлені до сушіння скибки та одержані чипси не окислювались протягом тривалого часу. Відбулося суттєве підвищення відновлюваності чипсів з яблук (до 96,7% проти 64,7% для необроблених). Одержані чипси набули вираженого смаку, легкої ламкості та ніжного хрускоту.

Список літератури:

- Chandrasekaran S., Ramanathan S., Basak Tanmay. Microwave food processing – A review. *Food Research International*. 2013. Iss. 52. Pp. 243–261.
- Lidia Dorantes-Alvarez, Alicia Ortiz-Moreno, Rosa Isela Guzman-Gero, Lidia Parada-Dorantes. Microwave Blanching. *In book: Reference Module in Food Science*. Publisher: Elsevier. 2017. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.21436-4.
- Дорошенко Є.В., Лапенко М.П., Леснік К.В., Філіпчук В.П., Яроцька К.Ю., Олексієнко В.О. Вплив попередньої обробки яблук ІЧ-променями на якість готової продукції і тривалість сушіння. *Міжнар. наук.-пр. інтернет-конф., 24 листопада 2020 р. ТДАУ ім. Д. Моторного*. 2020. С. 128-130.
- Yuhe Ma, Xiaoju Tian, Yingqiang Wang, Hongxia Zhao, Jialing Song. Comparative Study on Drying Characteristics and Quality of Apple Cubes Dried in Two Different Microwave Dryers. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2023. Vol. 73. No. 4. Pp. 367–374. DOI: <https://doi.org/10.31883/pjfn/174972>.

5. Taghinezhad E., Kaveh M., Szumny A. *et al.* Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices. *Scientific Reports*. 2023. Article number: 16152. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43358-6>.
6. Zhenjiang Hooray biology technology Co., LTD. Microwave freeze-drying and dehydrating method of fruits and vegetables. *Pat. 107095213 China*. МПК А23 L 19/00. № 102017000398973. pub. 29.08.2017.
7. Ma Heping. Method for producing apple chips by microwave vacuum drying. *Pat. 111296789 China*. МПК А23 L 19/00. №202010096009.2. pub. 19.06.2020.
8. Krischer O. Trocknungstechnik: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik: Die Grundlagen der Wärmeübertragung. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. 1978. Pp. 68-168. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61879-6_5.
9. Петровський О. М. Спосіб передпосівного опромінення насіння сільськогосподарських культур ультрависокочастотним електромагнітним полем. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*. 2011. № 107(1). С. 276-284.
10. Чміль, А. І., Лазарюк, К. О. Методи передпосівної обробки насіння кукурудзи в електромагнітному полі. *Енергетика і автоматика*. 2015. № 4. с. 227-234.
11. Dorantes-Alvarez L., Ortiz-Moreno A., Guzman-Gero R., Parada-Dorantes L. Microwave-assisted blanching. *The Microwave Processing of Foods (Second Edition)*. 2017. Pp. 179-199. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00009-7>.
12. Xiao H-W., Zhongli Pan, Deng L-Z., El-Mashad H.M., Yang X-H., Mujumdar A.S., Gao Z-J., Qian Zhang. Recent developments and trends in thermal blanching—a comprehensive review. *Information Processing in Agriculture*. 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.inpa.2017.02.001>.
13. Власенко В.В., Бандура В.М., Коляновська Л.М. Інтенсифікування екстрагування в технології виробництва рослинних олій: монографія. Вінниця: РВВ ВНАУ, 2016. 203 с.
14. Дмитренко Н.В. Вплив стану води на теплофізичні властивості та процес сушіння рослинної сировини: дис...канд. техн. наук 05.14.06. *ІТТФ НАН України*. Київ. 2016. 184 с.
15. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. Київ: *Сік Груп Україна*, 2018. 228 с.
16. Снежкін Ю.Ф., Михайлик В.А., Дмитренко Н.В., Шапар Р. О. Дослідження впливу паротермічної обробки паренхімних тканин яблук на кінетику сушіння та теплоту випаровування. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса. 2012. №41(1). С. 227-231.
17. Дмитренко Н.В. Вплив технологічних параметрів процесу сушки на теплоту випаровування вологи з рослинних тканин. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса. 2015. № 47(2). С. 52-55.
18. Husarova O.V., Dmytrenko N.V. Influence of microwave processing of apples on the process of convective drying. *Papers of III International Multidisciplinary Scientific and Theoretical Conference «Sectorial research XXI: characteristics and features»*. April 22, 2022. Chicago, USA: European Scientific Platform. 2020. Vol. 2. Pp. 51-52. ISBN 979-8-88526-804-2. DOI 10.36074/scientia-22.04.2022.
19. Дмитренко Н.В., Гусарова О.В. Вплив мікрохвильової обробки на процес конвективного сушіння та якість чипсів із яблук. *Матеріали Всеукраїнської н.-п. конференції “Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини”*. 8 червня 2023 р., Харків. 2023. С. 11-12.
20. Hindawi Ebrahim. Drying Kinetics and Rehydration Characteristics of Convective Hot-Air Dried White Button Mushroom Slices. *Journal of Chemistry*. 2014. Vol. 2014. Article ID 453175. Pp. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/453175>.

Dmytrenko N.V., Husarova O.V. INFLUENCE OF MICROWAVE TREATMENT ON PHYSICAL PROPERTIES OF APPLE PARENCHYMA TISSUES, CONVECTIVE DRYING AND ORGANOLEPTIC PROPERTIES OF CHIPS

The article deals with the influence of technical parameters of microwave treatment on the reduced specific heat of evaporation of water from apple tissues, convective drying, swelling coefficient, recoverability and organoleptic characteristics of chips.

In recent years, research on the use of microwave waves in plant drying technologies, including apples, has become popular. New processing methods are of considerable interest, and the use of high (HF) and ultra-high frequency (UHF) electromagnetic waves in drying technologies is considered promising.

The aim of the article is to determine the effect of microwave pretreatment on the heat of evaporation of moisture from apple parenchymal tissues, technological parameters of the thermal convective drying process, and the quality of the resulting chips.

Apples of the Renet Simirenko variety were used as the object of research. The power of the microwave waves was varied in the range from 400 to 800 W, and the time was in the range of 15...30 s. The apple drying

process was studied on an experimental convective drying bench at a drying agent speed of 1.5 m/s, moisture content of 7 g/kg of dry air, and a stepwise dehydration mode of 80...60 °C.

After microwave treatment, a significant increase in heat consumption for evaporation is observed (by 8...16% compared to the heat of evaporation of pure water), which indicates both a change in the water-holding capacity of plant tissue and the removal of all free water from the raw material at the stage of microwave treatment due to a sharp weakening of hydrate bonds. The combination of preliminary microwave treatment of sliced apple slices with subsequent two-stage convective drying allowed for a 14% intensification of dehydration and a significant reduction in the overall duration of the process. The short-term microwave treatment levelled and stabilised the colour of the apple parenchymal tissues: the slices prepared for drying and the finished chips did not oxidise for a significant time. There was a significant increase in the recoverability of the manufactured apple crisps (up to 96.7% compared to 64.7% for untreated crisps). The resulting chips acquired a pronounced taste, slight brittleness and delicate crunch.

Key words: microwave treatment, thermophysical properties, convective drying, renewability, apple crisps, energy efficiency.

Відомості про авторів

Андріянова М.В. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри технологій природних та синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Антипчук Б.О. – викладач першої категорії Житомирського агротехнічного фахового коледжу

Антонюк О.І. – старший викладач кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баранов Є.О. – аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Бсяновська О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетики Українського державного університету науки і технологій

Валуйський С.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вацеба Б.В. – аспірант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Воробйова В.І. – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гаврилюк А.О. – аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Гарист А.В. – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Глібчук А.Б. – аспірант Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Головенко В.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Гребьонкін Є.О. – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гусарова О.В. – кандидатка технічних наук, старша викладачка кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старша наукова співробітниця відділу ТМПТ Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

Дмитренко Н.В. – кандидатка технічних наук, старша наукова співробітниця, старша наукова співробітниця відділу ТМПТ Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

Дроздова Є.А. – старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Херсонського національного технічного університету

Єршомін О.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології, теплотехніки та охорони праці Українського державного університету науки і технологій

Єфімова В.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Заворотний В.Ф. – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зимовченко В.О. – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Іванчук О.В. – аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж Херсонського національного технічного університету

Катін П.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кириленко М.І. – учитель фізики Комунального закладу «Харківський лицей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

Кисіль А.І. – студент кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Коваленко І.Л. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології неорганічних речовин ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

Коваль Д.С. – магістр з дипломом кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Ковальов О.С. – кандидат військових наук, доцент, науковий співробітник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Ковальов О.С. – студент кафедри технології неорганічних речовин водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Козак Д.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Козел В.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Херсонського національного технічного університету

Колобовнікова Є.А. – студентка кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравченко І.М. – ДП «КІЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»

Кравчук І.В. – студент кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кунц Д.В. – молодший науковий співробітник кафедри технології неорганічних речовин та екології ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

Купрін М.О. – молодший науковий співробітник кафедри технології неорганічних речовин та екології ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

Лавріщев О.О. – Житомирський агротехнічний фаховий коледж

Лебедев Д.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Левченко Д.С. – аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Літинська М.І. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології неорганічних речовин водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лук'янюк С.В. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Луцюк А.В. – аспірант кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Майзеліс А.О. – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Малий О.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Малиновський В.В. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Українського державного університету науки і технологій ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

Мельник В.Д. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Мельник Л.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мігіна Н.Б. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

Мішин О.В. – магістр, аспірант кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мовчан К.О. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Несенюк Л.П. – науковий співробітник відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Ніколаєнко Ю.Є. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новосилецький Ю.Л. – Житомирський агротехнічний фаховий коледж

Павленко В.Я. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Пекур Д.В. – доктор філософії, старший дослідник, заступник завідувача відділом Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України

Петровський А.А. – незалежний дослідник

Пилипенко Т.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приходько Д.М. – магістр з дипломом кафедри вагонів та вагонного господарства ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Українського державного університету науки і технологій

Приходько О.О. – старший викладач кафедри галузевого перекладу та іноземних мов Херсонського національного технічного університету

Прокопенко О.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, теплотехніки та охорони праці Українського державного університету науки і технологій

Савіцький Д.О. – учень Комунального закладу «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»

Саражинський В.О. – студент 2 курсу магістратури кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Свідерський В.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Семичасєвський С.В. – старший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Сергієнко Я.О. – асистент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Українського державного університету науки і технологій

Сидорчук А.Ю. – магістрант приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Скакун О.В. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Скиба М.І. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

Скиба Ю.М. – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

Смірнов Ю.О. – кандидат економічних наук, доцент Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України

Соколов К.А. – аспірант радіотехнічного факультету кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сорокін В.М. – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова Національної академії наук України

Сухий К.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Українського державного університету науки і технологій

Тінтурін С.Г. – аспірант Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Топчій Н.В. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Фролова Л.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології Українського державного університету науки і технологій

Хайрнасів С.М. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хоперський С.В. – член правління НГО «Асоціація фахівців цивільного захисту»

Чайковський С.Ю. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Чмельов В.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехнічних систем радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шорнікова С.В. – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Юсіна Г.Л. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

Ясногор М.В. – магістр кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Яциняк І.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та програмування Івано-Франківської філії Університету «Україна»

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 6 2024

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 22,65. Ум. друк. арк. 28,59. Зам. № 0125/041.

Підписано до друку 30.12.2024. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.